



EDUARDO JOSÉ PEREIRA MARTIN

***Framework* para avaliação dos aspectos ambientais e sociais da gestão de
resíduos de garrafas pet pós-consumo**

BAURU
2021

EDUARDO JOSÉ PEREIRA MARTIN

***Framework* para avaliação dos aspectos ambientais e sociais da gestão de
resíduos de garrafas pet pós-consumo**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Bauru.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas Produtivos

Orientadora: Prof.^a Dra.Barbara Stolte Bezerra

BAURU
2021

Martin, Eduardo José Pereira.

Framework para avaliação dos aspectos ambientais e sociais da cadeia de suprimentos reversa de garrafas PET / Eduardo José Pereira Martin, 2021.

165 f.

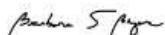
Orientadora: Profa. Dra. Barbara Stolte Bezerra

Tese (Doutorado)–Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021.

1. Avaliação do Ciclo de Vida . 2. Integração. 3. PET. 4. ACV Social e 5. AHP. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. *Framework* para avaliação dos aspectos ambientais e sociais da gestão de resíduos de garrafas pet pós-consumo

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE EDUARDO JOSÉ PEREIRA MARTIN, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 27 dias do mês de janeiro do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de EDUARDO JOSÉ PEREIRA MARTIN, intitulada **FRAMEWORK DA AVALIAÇÃO DOS ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DA GESTÃO DE RESÍDUOS DE GARRAFAS PET PÓS-CONSUMO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof^{ra}. Dr^a. BARBARA STOLTE BEZERRA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof^{ra}. Dr^a. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ENZO BARBERIO MARIANO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO ROCCO LAHR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Estruturas / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. OTAVIO JOSE DE OLIVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Produção / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof^{ra}. Dr^a. BARBARA STOLTE BEZERRA

Dedico este trabalho aos meus pais, Mauro e Nair, que sempre foram um referencial de conduta e persistência para mim. Aos meus irmãos, João Paulo, Luiz Gabriel e Mateus, pela oportunidade de crescer ao lado deles, vendo, em cada um, amor e companheirismo. Em especial, à minha esposa, uma companheira inseparável e admirável, sempre me impulsionando a prosseguir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me direciona no caminho certo e me ajuda a enfrentar e a vencer a cada desafio que surge em minha vida.

À minha amada esposa, Fernanda, que caminha ao meu lado, sempre me apoiando em todos os nossos empreendimentos. Agradeço-a por ser minha amiga, minha conselheira e meu suporte nas horas mais difíceis.

Aos meus pais, Mauro Gabriel Martin e Nair Pereira Martin, pela educação, força, dedicação e amor que sempre me proporcionaram.

À minha orientadora, Barbara Stolte Bezerra, que me auxiliou em minha caminhada ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Renato de Campos, Rosane Ap. Gomes Battistelle, Manoel Henrique Salgado, pelo apoio ao longo do desenvolvimento do Doutorado.

Aos funcionários da seção de Graduação e Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia de Produção, por estarem sempre dispostos a ajudar, contribuindo muito para o desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma metodológico para a elaboração dos <i>frameworks</i> para ACV ambiental e social da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo e sua integração.....	24
Figura 2: Fluxograma metodológico da execução dos <i>frameworks</i> para ACV ambiental e social da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo e sua integração – Estudo de caso.....	26
Figura 3: Tripé da Sustentabilidade (<i>Triple Bottom Line</i>).....	29
Figura 4: Ciclo de vida da garrafa PET	31
Figura 5: Coleta Seletiva Tradicional	34
Figura 6: Etapas da pesquisa	35
Figura 7: Número de artigos publicados ao longo dos anos.....	38
Figura 8: Foco de pesquisa	46
Figura 9: Setor analisado	49
Figura 10: Beneficiários da avaliação do ciclo de vida na cadeia de suprimentos.....	50
Figura 11: Setores de aplicação da avaliação do ciclo de vida.....	51
Figura 12: Reciclagem da PET	52
Figura 13: Benefícios de desempenho.....	53
Figura 14: <i>Framework</i> metodológico para realização da ACV - Ambiental	61
Figura 15: Limite do sistema para o cenário base (S1).	70
Figura 16: Limite do sistema para o cenário 2 (50% aterrado, 50% enviado para cooperativas de triagem, rejeito é aterrado).....	71
Figura 17: Limite do sistema para o cenário 3 (50% incinerados, 50% enviados para cooperativas de triagem, rejeitos de cooperativas de Bauru são incinerados, rejeitos de instalações de reciclagem em S. Carlos / Caieiras são depositados em aterro).....	72
Figura 18: Limite do sistema para o cenário 4 (50% aterrado, 50% incinerado).	73
Figura 19: Limite do sistema para o cenário 5 (100% enviado para cooperativas de triagem, o rejeito é depositado em aterro)	74
Figura 20: Limite do sistema para o cenário 6 (100% aterrado).	75
Figura 21: Limite do sistema para o cenário 7 (100% incinerado).	75
Figura 22: Limite do sistema para o cenário 8 (100% enviado para cooperativas de triagem, 50% coletado em Ecopontos, rejeito é depositado em aterro).....	76
Figura 23: Limite do sistema para o cenário 9 (100% enviado para cooperativas de triagem, 75% coletado em Ecopontos, rejeito é depositado em	77

Figura 24: Impacto total para as categorias de mudança climática e destruição da camada de ozônio e discriminação das contribuições.	86
Figura 25: Impacto total das categorias de acidificação terrestre e eutrofização de água doce e repartição das contribuições.	86
Figura 26: Impacto total para as categorias de toxicidade humana, ecotoxicidades terrestres e de água doce e repartição das contribuições.....	87
Figura 27: <i>Framework</i> metodológico para realização da ACV - Social	101
Figura 28: Metodologias para integração sustentável da Avaliação do ciclo de vida.....	121
Figura 29: Estrutura de avaliação do ciclo de vida e principais metodologias de análise de sustentabilidade	122
Figura 30: Etapas para integração das ACV's pelo método AHP.....	125
Figura 31: Cenário base para estudo de ACV ambiental.....	156
Figura 32: Gráfico do <i>Framework</i> dos impactos ambientais	158
Figura 33: Exemplo questionário para os Grupo 1 e 2	160
Figura 34: Pontuação Final.....	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Categorias para classificar e codificar os artigos analisados.....	38
Quadro 2: Lista de inventário : descrição dos processos na ficha 2 “Processos Simapro”.	80
Quadro 3: Resumo da revisão da literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida em resíduos de PET.	98
Quadro 4: Indicadores de categorias e subcategorias de partes interessadas	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados preliminares da pesquisa do banco de dados – Abril/ 2018.....	36
Tabela 2: Número Final de artigos selecionados.....	37
Tabela 3: Classificação e codificação dos estudos analisados	40
Tabela 4: Os 10 artigos mais citados e suas citações totais na base de dados Scopus	41
Tabela 5: Autores com o maior número de publicações	44
Tabela 6: Frequência de artigos classificados por contexto	45
Tabela 7: Frequência dos artigos classificados pelo método de pesquisa.	47
Tabela 8: Resíduos sólidos municipais (RSU) e resíduos PET coletados em 2019.....	64
Tabela 9: Distâncias de Transportes estimadas para a coleta do resíduo da garrafa PET em Bauru.	66
Tabela 10: Consumo de energia e entrada de materiais para reciclagem em Bauru (por ton. resíduo PET).....	78
Tabela 11: Frota de coleta e transporte em Bauru.	78
Tabela 12: Resultados de impacto ambiental para todos os cenários. Os valores de impacto são expressos por tonelada (t) de resíduos de PET.....	88
Tabela 13: O sistema de pontuação proposto.	109
Tabela 14: Sistema de pontuação	110
Tabela 15: Resumo dos resultados de sete subcategorias para os cinco cenários de eliminação	112
Tabela 16: Resultados de saúde e subcategoria de segurança para os cinco cenários de eliminação.....	113
Tabela 17: Pontuação de saúde e subcategoria de segurança para os cinco cenários de eliminação.....	113
Tabela 18: Pontuações para os cinco cenários de eliminação	114
Tabela 19: Pontuações finais para os cenários de descarte	114
Tabela 20: Comparação dos resultados	116
Tabela 21: ACV-Social normalizada de 0 à 1	127
Tabela 22: Matriz de preferência entre os cenários ACV-Social	127
Tabela 23: Pontuações normalizadas para critérios ambientais	133
Tabela 24: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final	133
Tabela 25: Prioridades entre os cenários – Ambiental	134
Tabela 26: Pontuações normalizadas para critérios sociais.....	135

Tabela 27: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final – SOCIAL.....	135
Tabela 28: Prioridades entre os cenários – SOCIAL.....	136
Tabela 29: Pontuações normalizadas para critérios ambientais e sociais.....	137
Tabela 30: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final – SOCIAL e AMBIENTAL	137
Tabela 31: Prioridades entre os cenários – SOCIAL e AMBIENTAL	137
Tabela 32: Índice de sustentabilidade entre os cenários.....	137
Tabela 33: Análise de sensibilidade índices de sustentabilidade	138
Tabela 34: <i>Framework</i> fluxo de material ACV.....	157
Tabela 35: <i>Framework</i> fluxo de transporte ACV	157
Tabela 36: <i>Framework</i> para os resultados da ACV.....	158
Tabela 37: Pontuação <i>Framework</i> –Social.....	161
Tabela 38: Dados de entrada ACV Social, sem normalizar	163
Tabela 39: Dados de entrada da ACV sem normalizar	164
Tabela 40: Classificação final após integração (Social e Ambiental)	165

LISTA DE ABREVIATURAS

ACCE	Avaliação do Ciclo e Vida Econômico
ASCV	Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida
ACVA	Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ACVS	Avaliação do Ciclo de Vida Social
AHP	Análise Hierárquica do Processo
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ASCAM	Associação dos Catadores de Materiais Recicláveis de Bauru e região
ASCV	Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida
ATP	Ácido Tereftálico Purificado
B2B	<i>Business-to-Business</i>
BR	Brasil
DS	Desenvolvimento Sustentável
EG	Etileno Glicol
EMBURD	Empresa Municipal de Desenvolvimento Urbano e Rural de Bauru
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
EURO	Europa
FEB	Faculdade de Engenharia de Bauru
GPL	Gás Liquefeito de Petróleo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCSA	<i>Life Cycle Sustainability Assessment</i>
MAVT	<i>Multiattribute Value Theory</i>
MDCA	<i>Multi-criteria decision analysis</i>
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PROMITHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation</i>
SEMMA	Secretaria Municipal do Meio Ambiente
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	VI
LISTA DE QUADROS.....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	18
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo principal.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
1.5 MÉTODOS UTILIZADOS NA TESE.....	23
2. REVISÃO ESTRUTURADA SOBRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA GARRAFA PET	27
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 REVISÃO TEÓRICA	28
2.2.1 Sustentabilidade.....	28
2.2.2 Avaliação Do Ciclo De Vida.....	30
2.2.2.1 Ciclo de vida da garrafa PET.....	30
2.2.2.2 Conceito e aplicações da Avaliação do Ciclo de Vida	31
2.2.3 Logística reversa	33
2.2.4 Revisão estruturada da literatura	35
2.2.4.1 Resultados da Análise Bibliométrica.....	38
2.2.4.1.1 Categorias Analisadas	45
2.2.4.2. Discussões	54
2.2.5 Considerações deste capítulo	55
3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO DESCARTE DA GARRAFA PET	57
3.1 INTRODUÇÃO.....	57
3.2 POLÍTICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL	59
3.3 Framework pAra aplicação da ACV ambiental	61
3.4 Aplicação do <i>framework</i> da ACV ambiental na cidade de Bauru	63
3.4.1. Objetivo e escopo	63

3.4.2. Inventário	78
3.4.3 Avaliação de impacto	84
3.4.4 Avaliação de impacto	85
3.4.4.1 Resultados.....	85
3.4.4.2 Discussão	91
3.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO	94
4. ACV SOCIAL DA GESTÃO DO RESÍDUO DA GARRAFA PET PÓS-CONSUMO	96
4.1 Introdução.....	96
4.2 Avaliação do ciclo de vida social (ACVS).....	97
4.2.1 Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo	98
4.2.2 Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo no Brasil.....	100
4.3 <i>Framework</i> para aplicação da ACV Social	101
4.4 Aplicação do <i>framework</i> da ACV ambiental na cidade de Bauru	103
4.4.1 Objetivo e escopo	103
4.4.1.1 Caracterização da área de estudo.....	104
4.4.1.2 Referência normativa ACVS	105
4.4.1.3 Objetivo	105
4.4.2 Inventário do ciclo de vida.....	107
4.4.3 Avaliação de impacto	108
4.4.4 Interpretação.....	111
4.4.4.1 Resultados da ACVS	111
4.4.4.2 Avaliação do impacto social.....	113
4.4.4.3 Interpretação	114
4.4.4.4 Discussão	116
4.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO	117
5. INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL DAS DESTINAÇÕES DO CICLO DE VIDA para GARRAFA PET	119
5.1 INTRODUÇÃO.....	119
5.2 REVISÃO TEÓRICA	120
5.3 <i>FRAMEWORK</i> PARA INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL DAS DESTINAÇÕES DO CICLO DE VIDA GARRAFA PET.....	124

5.4 APLICAÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i> DA INTEGRAÇÃO ACV AMBIENTAL E SOCIAL NA CIDADE DE BAURU	129
5.4.1 Definir objetivos.....	129
5.4.1.1 Objetivo e escopo	129
5.4.1.2 Fronteiras do sistema	129
5.4.2 Definir critérios dos pilares	132
5.4.3 Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência.....	132
5.4.3.1 Resultados da ACV – Ambiental	132
5.4.3.2 Resultados da ACV –SOCIAL	134
5.4.4 Definir os pesos entre as ACV´s e a razão de consistência.....	136
5.4.5 Ponderando as alternativas.....	137
5.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO	138
CONCLUSÃO DA TESE.....	141
REFERÊNCIAS	145
APÊNDICE A1 - Sistematização das contribuições dos artigos analisados.....	154
APÊNDICE A2 – <i>Framework</i> para avaliação do ciclo de vida ambiental de resíduos da garrafa pet.....	156
Apêndice A3 – <i>Framework</i> para avaliação do ciclo de vida social de resíduos da garrafa pet.....	160
APÊNDICE A4 – <i>Framework</i> para integração das ACV ambiental e social de resíduos da garrafa pet.....	163

RESUMO

A problemática dos resíduos é uma questão atual que precisa ser tratada com relevância. Apesar de a Política Nacional de Resíduos Sólidos ter sido instituída no ano de 2010, muito ainda tem que ser feito para seu pleno estabelecimento. Uma ferramenta que surgiu para potencializar a gestão de resíduos sólidos é Avaliação do Ciclo de Vida, porém sua utilização plena nos três pilares da sustentabilidade ainda é incipiente. Logo, este trabalho teve como objetivo estabelecer um *framework* para a realização de ACV e a ACV Social no momento em que a garrafa PET é descartada pelo usuário final, explorando alternativas que combinem a coleta seletiva convencional, utilização de Ecopontos e destinação final dos resíduos da garrafa PET não aproveitados para reciclagem. Este trabalho conseguiu atingir esse objetivo através de três objetivos específicos. O primeiro objetivo foi atingido através da revisão Estruturada da literatura onde foi possível mapear na literatura a aplicação da ACV dos resíduos de garrafa PET, evidenciando a lacuna de pesquisa e os fatores determinantes para a execução desta ferramenta. Esses fatores determinantes para a execução da ACV foram chamados de recomendações, e foram essas recomendações que serviram de entradas para a execução das ACV's e estabelecimento dos *Frameworks*. O segundo objetivo específico foi atingido através do estabelecimento de dois *Frameworks* para avaliar os impactos ambientais e sociais. Essas estruturas foram aplicadas no estudo de caso da cidade de Bauru, onde foram avaliadas 9 alternativas de destinação dos resíduos das garrafas PET descartadas. Nesta análise é possível encontrar a alternativa mais sustentável para destinação dos resíduos de garrafa PET, bem como uma estrutura base para nortear trabalhos futuros quanto aos pilares ambiental e social, analisados separadamente. Por fim, o terceiro objetivo específico foi atingido através do estabelecimento de um *framework* de integração das avaliações do ciclo de vida quanto aos impactos ambientais e sociais, utilizando a metodologia AHP modificada. A modificação do AHP se deu pela utilização dos resultados normalizados das ACV ambiental e social aplicados ao Vetor de Eigen para o estabelecimento de pesos entre os elementos analisados (Cenários e Pilares). Os três *frameworks* desenvolvidos podem ser utilizados em cidades que buscam realizar uma gestão sustentável quanto aos seus resíduos sólidos urbanos, assim atendendo os princípios legais das legislações em vigor, e gerando processos mais eficientes.

Palavras Chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Integração, PET, ACV Social, AHP.

ABSTRACT

The adequate waste disposal is a current issue that needs to be addressed. Although the advances of Brazilian National Solid Waste Policy settled in 2010, there is a long way to its fulfillment establishment. A tool that has emerged to enhance the management of solid waste is the Life Cycle Assessment. However, the use of the three pillars of sustainability in the LCA procedures is still incipient. Therefore, this work aimed to establish a framework for performing LCA and Social LCA at the time when the PET bottle is discarded by the end user, exploring alternatives that combine conventional selective collection, use of Ecopoints and final disposal. In order to achieve that, three specific objectives are established. The first objective was achieved through a systematic review of the literature where it was possible to map the application of the LCA of PET bottle waste, highlighting research gaps and the determining factors for the implementation of LCA. These determining factors for the execution of the LCA were called recommendations, and it was these recommendations that served as inputs for the execution of the LCAs and establishment of the Frameworks. The second specific objective was achieved through the establishment of two Frameworks to assess environmental and social impacts. These structures were applied in the case study of the city of Bauru, where 9 alternatives for the disposal of waste from discarded PET bottles were evaluated. In this analysis it is possible to find the most sustainable alternative for the disposal of PET bottle waste. Finally, the third specific objective was achieved through the establishment of a framework for the integration of LCA regarding environmental and social impacts, using the modified AHP methodology. The modification of the AHP was achieved using the normalized results of the environmental LCA and related to the Eigen Vector for the establishment of weights among the necessary elements (Scenarios and Pillars). The three frameworks developed can be used as a tool in cities that want to carry out sustainable management regarding its solid urban waste. Thus, complying with the legislation, and generating more efficient processes.

Keywords: Life Cycle Assessment, Integration, PET, Social LCA, AHP.

1. INTRODUÇÃO

O comércio atua como um elemento chave para aumentar a extração, processamento e degradação de recursos naturais. A situação fica mais crítica quando se nota uma relação comercial focada exclusivamente no aspecto econômico, não tendo relação com a dinâmica ambiental de regeneração de recursos naturais gerando uma questão de insustentabilidade (HUANG *et al* 2017).

Essa questão problemática se torna resolúvel quando se estabelece uma dinâmica de comercialização sustentável em longo prazo, onde se torna imprescindível a inclusão de aspectos ambientais e sociais na negociação. Sendo imperativa a utilização de robustos modelos de governança para atingir o objetivo de progresso da sustentabilidade quanto aos pilares: Ambiental, Social e Econômico (SAUTIER *et al.*, 2018).

Uma das iniciativas em resposta a essa questão, no Brasil, foi à instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) para permitir o enfrentamento do manejo impróprio dos resíduos sólidos. O PNRS tem como objetivo a prevenção e redução na geração de resíduos, instituindo a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos urbanos na Logística Reversa dos resíduos e embalagens pós-consumo (MMA, 2015).

Entretanto conforme último estudo da ABRELPE (2018/2019) a geração de lixo no Brasil teve um incremento de 0,39% per capita entre os anos de 2017 e 2018. No ano 2018 a estimativa de geração de lixo foi de 79 milhões de toneladas, onde apenas 92% foram coletados (72,7 milhões). E ainda 40,5% dos 72,7 milhões de toneladas de resíduos sólidos coletados no país em 2018 tiveram como destino lixões e aterros controlados, que são locais inadequados e oferecem riscos ao meio ambiente e à saúde (ABRELPE, 2018/2019).

Dentre os descartes de resíduos sólidos de grande potencial para a reciclagem destaca-se o resíduo de PET (Polietileno tereftalato), principalmente nos resíduos de garrafas PET. Segundo os últimos dados do censo da ABI PET (2016a) 51% das 274.000 toneladas do resíduo de PET são reaproveitados, o restante cerca de 130 mil toneladas são descartadas de maneira inadequada.

Um fator limitante para evolução da reciclagem do PET no Brasil é o sistema de coleta seletiva convencional. A grande maioria dos consumidores não se preocupa em separá-lo, descartando-o juntamente com materiais orgânicos e outros materiais em seu

lixo domiciliar, que vem a diminuir o padrão produtivo nas cooperativas de reciclagem (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Com a responsabilidade compartilhada sobre os resíduos, as fontes geradoras podem financiar as soluções ambientais, como os Ecopontos, e assim melhorar o sistema de coleta convencional e atender a PNRS. Porém, essas soluções precisam ser avaliadas em relação ao seu benefício ambiental. Surge nessa área a ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) o qual potencializa essa ação, identificando os impactos causados pela geração dos resíduos, tratamento e disposição dos mesmos (PARK; GUPTA, 2015).

Os atores envolvidos neste processo de gestão de resíduos de garrafa PET (Coletores de resíduos, Cooperados e Motoristas, operadores do Aterro) são afetados socialmente de acordo com os diferentes roteiros de destinação final. (HUERTAS-VALDIVIA et al, 2020).

Essas pessoas que desenvolvem na prática a operacionalização da gestão de resíduos sofrem frente à sociedade, sendo por vezes marginalizados. Onde suas atividades em si não são valorizadas, o que se reflete tanto na projeção de carreira quanto na remuneração que lhes é oferecida (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Assim, torna-se necessário utilizar uma ferramenta que mensure e seja elemento norteador para comparação entre as alternativas de destinação final de resíduos sobre a ótica do aspecto social. Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) apontam a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) como elemento essencial para mensurar os impactos sociais.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar da cadeia de suprimentos reversa do PET pós-consumo ser viável, a coleta dos materiais recicláveis ainda pode ser aperfeiçoada no Brasil e no mundo. Embora a maioria dos consumidores possua algum conhecimento sobre os impactos ambientais causados pelo descarte de materiais recicláveis no lixo doméstico comum, a evolução da reciclagem ocorre lentamente. E, como consequência, a disponibilidade do material reciclado do tipo PET é limitada, promovendo uma influência negativa em seu custo e dificultando a absorção desse material pelo mercado (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Isto posto, deve-se entender a reciclagem do PET como uma cadeia de suprimento para outros setores, abrangendo o aspecto da sustentabilidade. A coleta dos resíduos está no início da cadeia reversa do PET. No entanto, a grande maioria das coletas são realizadas por coletores (catadores), submetidos às condições sub-humanas. Sendo em sua grande maioria pessoas sem perspectivas de empregabilidade em outros setores, devido ao baixo índice de escolaridade, problemas de saúde; e que, se sujeitam às condições precárias e com baixa remuneração. Essa situação é agravada pela localização dispersa dos resíduos, forçando os coletores a buscarem esses materiais nas ruas em condições de alta insalubridade e periculosidade.

Dessa forma, a existência de Ecopontos pode contribuir para a solução da precariedade da atividade dos coletores, minimizando os custos de transporte e incentivando a população a separar o material reciclável. Logo se faz necessário efetuar uma avaliação aprofundada, sistêmica e interdisciplinar sobre a problemática em função de três premissas: o resíduo da garrafa PET como uma cadeia de suprimento para outros setores; o impacto social sobre as condições dos coletores, e o impacto ambiental da utilização de formas diferentes de coleta através dos Ecopontos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um *framework* para a integração entre a ACV Ambiental e a ACV Social no momento em que a garrafa PET é descartada pelo usuário final, explorando alternativas que combinem a coleta seletiva convencional, utilização de Ecopontos e destinação final dos resíduos da garrafa PET não aproveitados para a reciclagem.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- A. Definir quais são os fatores que realmente influenciam na avaliação da sustentabilidade, através da identificação dos fatores determinantes para aplicação da avaliação do ciclo de vida (ACV) na fronteira do descarte da

garrafa PET pelo usuário final até as cooperativas de reciclagem da garrafa PET e destino final dos resíduos, por meio de uma revisão estruturada da literatura.

- B. Criar um *framework* para avaliar os impactos ambientais e sociais, e aplicar essa estrutura de avaliação sobre um estudo de caso contendo 9 alternativas de destinação de resíduos de garrafas PET descartadas pelo usuário final no município de Bauru, São Paulo.
- C. Agregar os impactos ambientais e sociais em um único sistema e realizar a análise de sensibilidade através da atribuição de pesos sobre as perspectivas da ACV Ambiental e Social utilizando um *framework*. Aplicando essa estrutura sobre os dados do estudo de caso.

1.3 JUSTIFICATIVA

A relevância de estudos e práticas voltadas ao desenvolvimento sustentável teve forte crescimento após a emissão do Relatório de Brundtland no ano de 1987, onde houve uma disseminação do conceito de sustentabilidade a nível mundial. As organizações passaram a debater formas de atingir o desenvolvimento sustentável através da integração de aspectos ecológicos, sociais em seus produtos e processos produtivos (KLEWITZ e HANSEN, 2014).

Nesta busca pela sustentabilidade, Fiorini e Jabbour (2017) apontam a importância de pesquisas que utilizem de sistemas de informação para integrar os aspectos ambientais, sociais e econômicos nas organizações. Evidenciando essa ação como essencial para gerar uma gestão sustentável, possibilitando as organizações perseguir o desenvolvimento sustentável pela incorporação de práticas que levam a empresa atingir a sustentabilidade.

Sistemas de integração da avaliação do ciclo de vida sob os aspectos ambiental, social e econômico tem se mostrado relevantes para busca da sustentabilidade, conforme definido nos modelos apresentados por Kloepffer (2008). (2008).

Porém, especificamente sobre os resíduos de garrafas PET existe uma necessidade de aprofundar estudos da integração sobre os impactos socioambientais. Isto pode ser constatado através do resultado da revisão estruturada da literatura apontada no capítulo 2. De 22 artigos selecionados com a temática central sobre avaliação do ciclo de vida de resíduos da garrafa PET, apenas os dois trabalhos de

Foolmaun e Ramjeawon no ano de 2013 focaram nas integrações entre os pilares da sustentabilidade. Integração socionambiental em Foolmaun e Ramjeawon (2013a) e integração social, econômica e ambiental em Foolmaun e Ramjeawon (2013b).

Os demais trabalhos: Navajas et al. (2017), Van Uytvanck et al. (2017), Aganovic et al. (2017), Hottle et al. (2017), Accorsi et al. (2015), Elduque et al. (2015), Akanuma et al. (2014), Kuczenski e Geyer (2013), Amienyo et al. (2013), Kang et al. (2017), Chen et al. (2016), Saleh (2016), Leejarkpai et al. (2016), Ingrao et al. (2016), Ingrao et al. (2014), Manfredi e Vignali (2015), Van Uytvanck et al. (2014), Papong et al. (2014), Toniolo et al. (2013) e Park e Gupta (2015), focaram majoritariamente no aspecto ambiental dos respectivos sistemas analisados. Evidenciando um gap a ser preenchido através desta pesquisa.

Essa pesquisa no SCOPUS revelou uma lacuna no emprego da avaliação do ciclo de vida em países em desenvolvimento, apenas 27% dos trabalhos: Foolmaun e Ramjeawon (2013), Saleh (2016), Leejarkpai et al. (2016), Papong et al. (2014) e Park e Gupta (2015), focaram em países em desenvolvimento. Sobre essa lacuna Saleh evidencia a necessidade de se empregar a utilização da ACV em países em desenvolvimento como forma de fomentar a sustentabilidade dos processos empresariais de maneira sinérgica à legislação local.

Observada a recomendação de Saleh (2016) justifica-se aplicar o estudo em uma cidade brasileira (Bauru-SP) para gerar um cenário que potencializa a colaboração entre empresas, sociedade e governo para promover a Política Nacional dos Resíduos Sólidos Brasileira (BRASIL, 2010). Recomendação ratificada por Foolmaun e Ramjeawon (2013b), onde demonstrou essa sinergia entre os apontamentos sustentáveis da ACV e a vinculação ao desenvolvimento de políticas públicas para o desenvolvimento sustentável.

Jabbour et al. (2014) mostrar que pode ser salutar aplicar esse tipo de pesquisa em uma cidade brasileira sob dois aspectos. O primeiro refere-se ao aspecto de colaboração para o estabelecimento da PNRS e outro ponto na divulgação do modelo sustentável de gestão à outros países, visto que o Brasil é um país de alta relevância na América do Sul.

A partir dos argumentos colocados, observa-se a importância de desenvolver um *framework* para a avaliação do ciclo de vida socioambiental de garrafas PET. Fornecendo assim uma estrutura base que poderá ser utilizada em outras cidades e

países. Contribuindo assim para o estabelecimento de políticas públicas e as diretrizes de desenvolvimento sustentável.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese foi escrita pensando cada capítulo como um artigo científico independente, respectivamente o Capítulo 2, Capítulo 3, Capítulo 4 e Capítulo 5. Contudo, todos os trabalhos apresentam uma conexão com o tema central: Uma estrutura para Avaliação do Ciclo de Vida da gestão dos resíduos da garrafa PET pós-consumo. Descreve-se a seguir a estrutura base de cada capítulo:

- **Capítulo 1 → Introdução.**

Apresenta a caracterização sobre a problemática dos resíduos da garrafa PET, os objetivos a serem alcançados, justificativa da pesquisa, estrutura do trabalho e a metodologia de pesquisa.

- **Capítulo 2: Revisão estruturada sobre a avaliação do ciclo de vida da garrafa PET**

Apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os resíduos de Garrafa PET pós-consumo (Logística Reversa, Ciclo de vida da garrafa PET e Avaliação do Ciclo de Vida). E por fim uma avaliação Estruturada da literatura sobre a aplicação da ACV no descarte da garrafa PET, evidenciando a lacuna de pesquisa e escopo deste trabalho. Neste capítulo, buscou-se atender ao objetivo específico A.

- **Capítulo 3: Avaliação ambiental do descarte da garrafa PET**

Nesta seção apresenta-se o *framework* para a ACV ambiental e os respectivos resultados e discussões do estudo de área, abordando os impactos ambientais dos diferentes cenários propostos para a gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo. Neste capítulo, buscou-se atender ao objetivo específico B.

- **Capítulo 4: Avaliação social do descarte da garrafa PET**

Este capítulo apresenta o *framework* para a ACV Social e os respectivos resultados e discussões do estudo de área, abordando os impactos sociais dos diferentes cenários propostos para a gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo. Neste capítulo, buscou-se atender ao objetivo específico B.

- **Capítulo 5: Integração da avaliação ambiental e social das destinações do ciclo de vida para garrafa PET**

Ocorre a descrição dos métodos para agregar os indicadores. Revisão dos métodos de normalização e ponderação; Definição do método escolhido e justificativas para a escolha do respectivo método. Neste capítulo, buscou-se atender ao objetivo específico C.

- **Capítulo 6: Conclusões**

Apresentação das conclusões e limitações da presente pesquisa, finalizando com as recomendações para futuros trabalhos.

1.5 MÉTODOS UTILIZADOS NA TESE

Este trabalho utilizou a metodologia multimétodo devido à complexidade de sua temática. Esta seção se dedica a descrever brevemente os métodos utilizados ao longo desta pesquisa e suas respectivas inter-relações, sendo que as especificidades metodológicas de cada capítulo são descritas em seus próprios capítulos: No capítulo 3, o item 3.3 descreve a metodologia para aplicação do *framework* da ACV ambiental; No capítulo 4, o item 4.3 descreve a metodologia para aplicação do *framework* da ACV social; e já no capítulo 5, o item 5.3 descreve a metodologia para aplicação do *framework* de integração entre a ACV Ambiental e a ACV social.

Constata-se que a abordagem multimétodo se destaca por ser uma das formas mais completas para avaliar situações de alta complexidade, pois ela combina a força das grandes amostras e sua capacidade de generalização, com o emprego de estudos de caso que tem uma capacidade de identificação causais (DE OLIVEIRA, 2015).

Seguindo a segunda recomendação (R2) oriunda da etapa de revisão estruturada da literatura (Capítulo 2) para a integração entre os pilares social e ambiental, empregou-se a abordagem multimétodos, também chamada de multicritério, apontada por Akhtar et al. (2015), De Luca et al. (2018), Hossaini *et al*, (2015), Opher; Friedler; Shapira, (2019) e Ekener et al. (2018).

Empregando-se o método AHP para realizar a integração entre as metodologias de ACV ambiental e social. Sendo esse método AHP recomendado pelas revisões estruturadas da literatura conduzida por Visentin et al. (2020) e Costa; Quinteiro; Dias (2019). Contudo observa-se que neste trabalho contornou a parcialidade do método

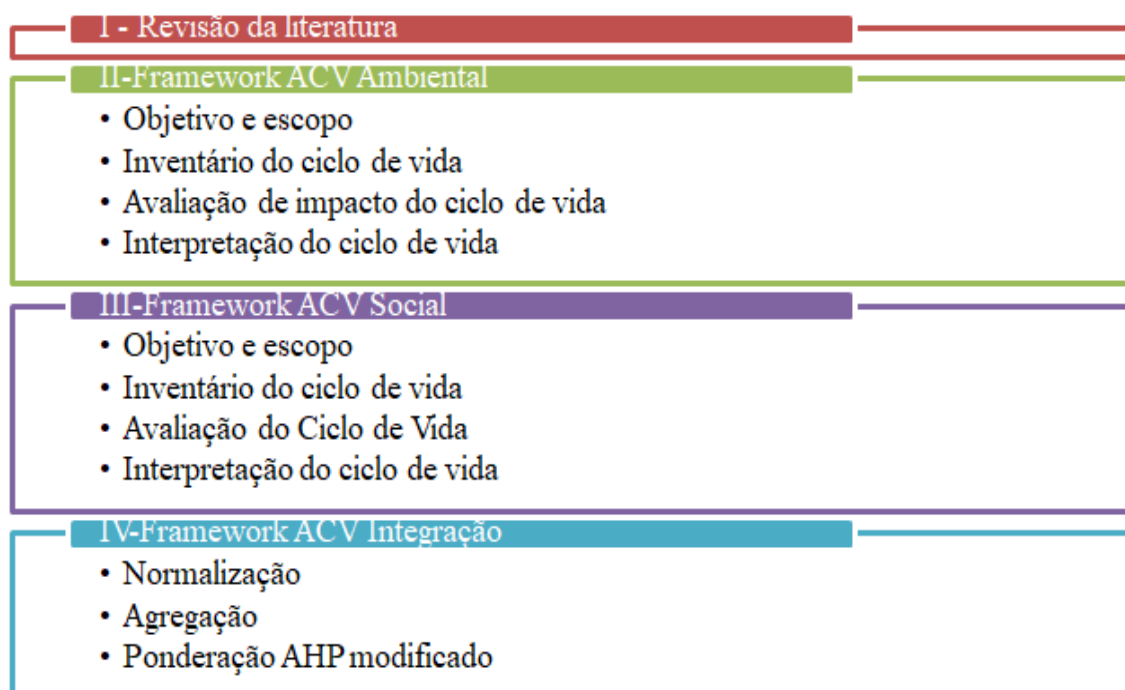
AHP pela alteração no processo de ponderação (Esta alteração é descrita no item 5.3 do capítulo 5).

Com relação aos procedimentos e técnicas este trabalho é exploratório, pois busca empiricamente a familiarização com o problema, no intuito de torná-lo explícito (GIL, 2019).

Quanto à aplicação buscou-se estabelecer um conjunto de linhas guia para nortear a execução de trabalhos futuros, caracterizando-se pela elaboração de um *framework* para aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida da garrafa PET pós-consumo. Conforme Tako e Kotiadis (2015) o emprego de um *framework* tem a finalidade de auxiliar a execução de uma ferramenta de trabalho, e sua execução é facilitada pelo detalhamento dos passos de aplicação.

Assim, esta pesquisa pode ser caracterizada como exploratória e aplicada. Pois, procura entender e vincular conhecimentos teóricos da literatura existente à resolução prática de um sistema de gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo. Este trabalho se desenvolveu em quatro fases, onde a Figura 1 ilustra o fluxograma metodológico da pesquisa que é descrito a seguir.

Figura 1: Fluxograma metodológico para a elaboração dos *frameworks* para ACV ambiental e social da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo e sua integração



Fonte: Elaborado pelo autor.

- I. A primeira etapa de revisão da literatura é fundamental para que se possa encontrar mais informações sobre a temática abordada, e também especificamente em relação à gestão sustentável na cadeia escolhida.

A primeira etapa gerou as entradas para alimentar tanto a ACV Ambiental quanto a ACV Social.

- II. A segunda etapa consistiu na aplicação da normativa da ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b).

Essas normas apresentam linhas direcionadoras para a execução da avaliação do ciclo de vida. Onde a ACV é dividida em quatro etapas, a saber: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

- III. A terceira etapa consiste na utilização das Diretrizes da UNEP/SETAC, (2009) e categorias e subcategorias UNEP/SETAC (2013), para a avaliação do ciclo de vida social.

Adotaram-se neste *framework* os padrões da ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b) integradas às diretrizes da UNEP/SETAC (2009 e 2013) para promover a integração entre os sistemas.

- IV. A quarta etapa trata da utilização da metodologia de normalização para comparação dos cenários analisados, onde os mesmos são agregados via adicional (metodologia mais empregada de acordo com Costa et al. (2019). Os dados normalizados seguem para a fase de ponderação através do método AHP modificado (Método estabelecido nesse trabalho, onde os pesos são estabelecidos pelos resultados dos impactos socioambientais através do cálculo do Vetor de Eigen).

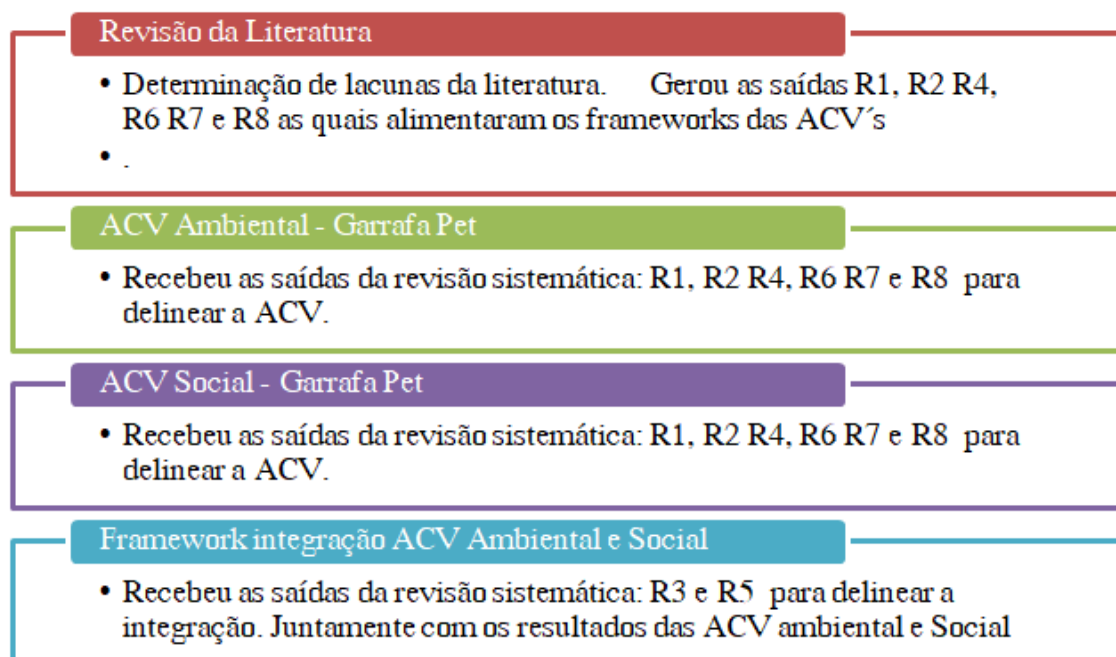
Para avaliar os resultados estabelecidos nessa etapa utilizou-se como ferramenta a análise de sensibilidade para aferir os pesos (prioridades), como referendado em Foolmaun e Ramjeawon (2013a).

A Figura 2 mostra o passo a passo da execução dos três *frameworks* propostos quanto à aplicação para o estudo de caso dos resíduos de garrafas PET para cidade de Bauru/SP/Brasil: o primeiro *framework* foi aplicado para a ACV ambiental, o segundo *framework* para ACV social e ambiental, e o terceiro *framework* para a integração dos resultados da ACV ambiental com a ACV social.

O resultado da revisão estruturada da literatura (Capítulo 2) gerou entradas para delinear os elementos dos construtos para estabelecer cada etapa da ACV (Limites, unidade funcional, cenários da Avaliação do ciclo de vida Ambiental e Social).

Na Figura 2 é mostrada que as ACV Ambiental e Social também foram elementos de entrada para a integração do sistema através do método AHP modificado.

Figura 2: Fluxograma metodológico da execução dos *frameworks* para ACV ambiental e social da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo e sua integração – Estudo de caso



Fonte: elaborado pelo autor.

Os capítulos quatro, cinco e seis descrevem de maneira mais minuciosa a execução de cada *framework*, tendo como aplicação 9 cenários de gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo, para a cidade de Bauru, Estado de São Paulo, Brasil.

2. REVISÃO ESTRUTURADA SOBRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA GARRAFA PET

2.1 INTRODUÇÃO

A questão da sustentabilidade ambiental tem impactado cada vez mais as organizações e norteado as pesquisas, onde se procura trabalhar com a otimização de recursos com o mínimo de impacto sobre o meio ambiente. Nesta perspectiva surgiu a ferramenta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) o qual potencializa essa ação, identificando os impactos causados pelos processos de produção e desenvolvimento de produtos (PARK; GUPTA, 2015), consolidado como uma ferramenta relevante para a adoção e gestão ambiental.

Diversos estudos tem demonstrado a abrangência desta ferramenta como busca da sustentabilidade ambiental da cadeia de suprimentos do polietileno tereftalato, (COSTA et al., 2019).

Na busca para incorporar práticas ambientais e sustentáveis na cadeia de suprimentos, as organizações exigem uma grande quantidade de informações de seus parceiros. Dessa forma, é primordial a integração de aspectos ambientais, financeiros, sociais e operacionais, através de sistemas de informação, de forma a agregar eficientemente o sistema analisado (FIORINI; JABBOUR, 2017).

Na literatura pesquisada não foram identificados estudos que tratassem de forma sistematizada o conhecimento existente sobre a ACV na cadeia de embalagens de PET, o que norteou a indagação de pesquisa, ou seja: Quais estudos abordam o uso da avaliação do ciclo de vida para apoiar a gestão sustentável da cadeia de suprimentos da garrafa PET?

Portanto, o objetivo deste estudo foi identificar e sistematizar artigos acadêmicos sobre o uso da ACV para apoiar a gestão sustentável da cadeia de suprimentos e sugerir possíveis lacunas de pesquisas.

Esse trabalho apresenta informações relevantes para pesquisadores salientando os benefícios de usar sistemas da ACV para o gerenciamento sustentável da cadeia de suprimentos do PET, fornecendo uma visão geral do que foi produzido na literatura internacional existente, bem como as lacunas sobre a temática.

2.2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre Sustentabilidade, Avaliação do Ciclo de Vida (Ambiental e Social) e Logística Reversa com enfoque no resíduo da garrafa PET. Esta etapa foi essencial para elaboração do arcabouço teórico relevante para atingir o objetivo de pesquisa.

2.2.1 Sustentabilidade

O esboço do termo sustentabilidade se deu em Estocolmo no ano de 1972 durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano. Onde as principais convenções elencadas foram:

- 1- Fundação do Patrimônio Mundial - a principal preocupação é com a conservação de áreas de grande valor e interesse para a humanidade por sua fauna, flora, estruturas geológicas e paisagísticas.
- 2 - Conservação de Zonas Úmidas de Importância Internacional - preocupada principalmente com a conservação de aves aquáticas migratórias na Europa, Ásia Menor e África. Do ponto de vista canadense, pode-se notar que o Tratado de Aves Migratórias de 1916 (tornado efetivo pelo Ato de Convenção de Aves Migratórias de 1916) já existe para a conservação de aves aquáticas no continente americano.
- 3 - Conservação de Ilhas para a Ciência - preocupada com a preservação de ilhas vulneráveis de valor especial para a ciência como locais para estudos de evolução, genética, dinâmica populacional e muitos tópicos relacionados.
- 4 - Exportação, Importação e Trânsito de Certas Espécies de vida Selvagem e Plantas - visa proteger a vida selvagem pelo controle do movimento internacional do comércio (CARLISLE, 1972, pg. 1).

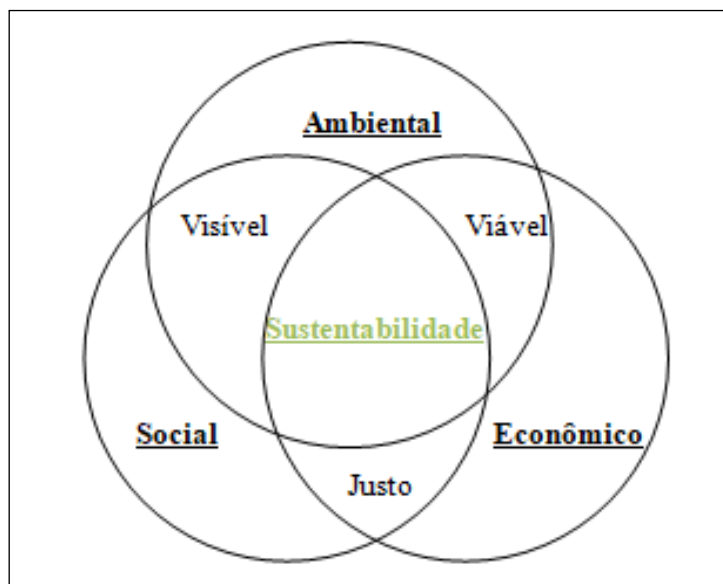
Porém, no Relatório de BRUNDTLAND (1987) o conceito de sustentabilidade passa a ser entendido como "suprir as necessidades da geração presente sem afetar a habilidade das gerações futuras de suprir as suas".

Apesar disso muitas discussões foram realizadas em torno dessa definição. E a partir da ECO 92, o conceito de Desenvolvimento Sustentável abarcou em suas diretrizes três pilares: meio ambiente, equidade social e economia. Nesta conferência destacou-se como exemplo dessa diretriz a água como elemento sustentável de extrema importância para a sobrevivência e desenvolvimento humano, de caráter limitado e vulnerável. A Agenda 21 foi um dos principais frutos do ECO 92, onde foi estabelecido um novo padrão de desenvolvimento em âmbito global, chamado como "desenvolvimento sustentável". (SPINELLI et al., 2016).

Contudo as ações de sustentabilidade tem focado predominantemente no pilar ambiental em detrimento dos pilares social e econômico. Alinhar os efeitos sociais e econômicos com a redução do efeito ambiental negativo tornou-se altamente relevante no projeto de redes de logística reversa (SAFDAR; KHALID; AHMED; IMRAN, 2020).

Norteados pelos pilares econômico, social e ambiental, Elkington (1994) estabeleceu o conceito *Triple Bottom Line* (TBL). A ideia norteadora foi fornecer uma base para a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável para apoiar as empresas na busca da sustentabilidade. A Figura 3 apresenta as relações entre os pilares do Tripé Da Sustentabilidade (TBL).

Figura 3: Tripé da Sustentabilidade (*Triple Bottom Line*)



Fonte: Adaptado de Elkington (1994) .

Observando cada pilar do tripé da sustentabilidade, tem-se que: o eixo econômico visa o estabelecimento de negócios rentáveis aos investidores; o eixo Ambiental visa a minimização dos efeitos ambientais negativos resultantes da interação com o processo produtivo; e o eixo social visa balizar medidas justas para os elementos inseridos no sistema analisado (OLIVEIRA et al., 2011).

O *Triple Bottom Line* (TBL) e sustentabilidade são dois conceitos interligados e que são utilizados como sinônimos na literatura. Contudo há convergência na utilização dos termos quando associada à estrutura simultânea do TBL em seus três pilares atuando de forma integrada.

2.2.2 Avaliação Do Ciclo De Vida

Neste item será abordado o conceito de ciclo de vida da garrafa PET e a relevância da avaliação do ciclo de vida dentro do escopo de pesquisa.

2.2.2.1 Ciclo de vida da garrafa PET

Segundo Prado e Kaskantzis Neto (2005), o ciclo de vida inicia-se quando os recursos para sua fabricação são removidos de sua origem, a natureza – o berço, e finaliza-se quando o material retorna para a terra – o túmulo. Este autor ressalta que a análise de ACV é de extrema relevância para a gestão sustentável, incluindo as emissões para solo, ar e água, possibilitando o estudo do berço ao túmulo de diversos produtos, serviços e processos.

A garrafa PET pode ser considerada um produto configurado como embalagem. O termo embalagem pode ser definido como qualquer produto feito de materiais de qualquer natureza para ser usado para conter, proteger, manusear, entregar e apresentar mercadorias, de matérias-primas a produtos acabados, e do produtor para o usuário ou consumidor. (NAVAJAS et al., 2017).

O ciclo de vida da garrafa PET compreende duas etapas, conforme mostra a Figura 4. A cadeia direta envolve cinco fases: Produção da resina de PET, Fabricação da Embalagem, Engarrafamento de bebidas, Distribuição e Consumo; e depois se inicia a etapa da cadeia reversa: Coleta Seletiva, Reciclagem, Aplicação em outras indústrias, e por fim, Disposição Final dos rejeitos.

O apoio à tomada de decisão na área de gestão de resíduos pode ser realizado utilizando-se a abordagem da ACV, que é habitualmente empregada para identificar os impactos ambientais da reciclagem (TONIOLO et al., 2013).

Porém, a legislação brasileira restringe a utilização de embalagens plásticas recicladas para alimentos. Assim, essas embalagens devem ser recolhidas para serem destinadas à reciclagem para outros fins (SILVA e RODRIGUES, 2015).

Desta forma, destaca-se que a indústria de alimento tem a possibilidade por meio da logística reversa de recolher suas embalagens e encaminhá-las ao descarte ou reaproveitamento, repassando-as para outras indústrias que possam reciclar tal produto.

Esse tipo de ação da logística reversa de resíduos atua de maneira sinérgica com a Economia Circular. Uma vez que avalia a viabilidade de redes reutilizarem materiais recicláveis com objetivo de propor opções de eficiência com relação ao uso de recursos.

Figura 4: Ciclo de vida da garrafa PET



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse novo conjunto de ações colabora para a migração de um novo paradigma sustentável (CHAHLA; ZOUGHAIB, 2019).

2.2.2.2 Conceito e aplicações da Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como ferramenta relevante para identificar os impactos causados pelos resíduos gerados nos processos de produção (PARK; GUPTA, 2015), e para obtenção de uma visão global dos impactos ambientais associados ao desenvolvimento de produtos (DOS SANTOS *et. al.*, 2014).

ACV tem ocupado um lugar de importância nos processos de tomada de decisão, pois contribui de forma sistemática para a compreensão dos impactos ambientais (RIGAMONTI *et. al.*, 2010). A metodologia da ACV tem sido utilizada amplamente e tem gerado resultados importantes para mensuração de impactos ambientais, contudo

exige tempo e esforço para a aquisição de dados de alta qualidade, fase de inventário. (SU et al., 2020)

E sua utilização na fase de desenvolvimento é muito benéfica, pois traz os possíveis impactos ambientais de cada alternativa, sendo assim uma robusta ferramenta para auxiliar a tomada de decisão nas empresas que buscam o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis (LUZ et al., 2018).

A NBR ISO 14.040:2014 norteia a aplicação da avaliação do ciclo de vida em quatro fases (ABNT, 2014a):

- 1 - A definição do objetivo e escopo do estudo;
- 2 - A construção de um inventário de ciclo de vida;
- 3 - A avaliação do impacto do ciclo de vida, e
- 4 - A interpretação.

Na primeira fase são estabelecidos os setores onde serão avaliados os impactos ambientais. A fase do inventário traz os elementos de coleta dos dados necessários para o alcance dos objetivos de pesquisa. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase que foca em avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário por meio de modelos. E por fim, a quarta fase engloba a interpretação de todos os resultados em conjunto, gerando conclusões e recomendações para as partes interessadas (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Segundo Formigoni, Santos, Medeiros (2014) o estudo da ACV e da gestão ambiental, sob a ótica da logística reversa, contribui significativamente para entender as possíveis soluções ambientais. Os princípios da logística reversa, bem como seu diferencial competitivo, potencializa a mitigação dos custos e contribui para a preservação ambiental (SILVA; RODRIGUES, 2015).

Assim, a ACV é o principal método para calcular os impactos ambientais do berço ao túmulo de produtos e serviços. É promovida por muitas políticas públicas e integrada como parte de sistemas de informação ambiental dentro de empresas privadas. A ACV já trata dos possíveis impactos da biodiversidade no uso da terra, mas há obstáculos significativos a serem superados antes que seus modelos compreendam o alcance total dos fenômenos envolvidos, isto é, se torna necessário obter modelos que não sejam simplificadores demais, mas que consigam captar a dinâmica e a complexidade reais das interações das espécies entre si e com seus habitats (SOUZA; TEIXEIRA; OSTERMANN, 2014).

2.2.3 Logística reversa

Existem definições clássicas sobre a distinção de Logística da Cadeia de Suprimentos (BALLOU, 2009):

- A Logística tem o seu foco nos processos internos da empresa, onde se prioriza a capacidade da empresa em atender os seus clientes nos parâmetros acordados tempo, quantidade, local, tendo por dicotomia tomar os processos de armazenagem e transporte para atingir esse objetivo logístico.
- Já a Cadeia de Suprimentos ultrapassa o cerne de atender os objetivos operacionais da empresa e incorpora os valores estratégicos da empresa (Mais elos da cadeia de suprimentos), visando obter vantagem competitiva.

A Logística Reversa surgiu como uma dimensão importante para as organizações construírem sua vantagem estratégica, impactando tanto na administração interna quanto externa da cadeia de suprimentos. (GOVINDAN; SARKIS; PALANIAPPAN, 2013).

Logo esse trabalho assume a Logística Reversa como sendo um elemento estratégico para toda cadeia de suprimentos. Utilizando-se o termo Cadeia de Suprimentos Reversa como sinônimo para Logística Reversa.

A Logística Reversa é um instrumento que pode ser utilizado pela empresa no intuito de reduzir os impactos produzidos e de alcançar o desenvolvimento sustentável (CORRÊA e SILVA, 2013).

A Logística Reversa aufere estima, cada vez mais elevada, tanto no meio acadêmico quanto entre os profissionais de cadeia de suprimentos, não só por ser um dos instrumentos para a prática da sustentabilidade, como também por seu papel estratégico em muitos segmentos econômicos (ARAÚJO *et. al.*, 2013).

A PNRS define a Logística Reversa como um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

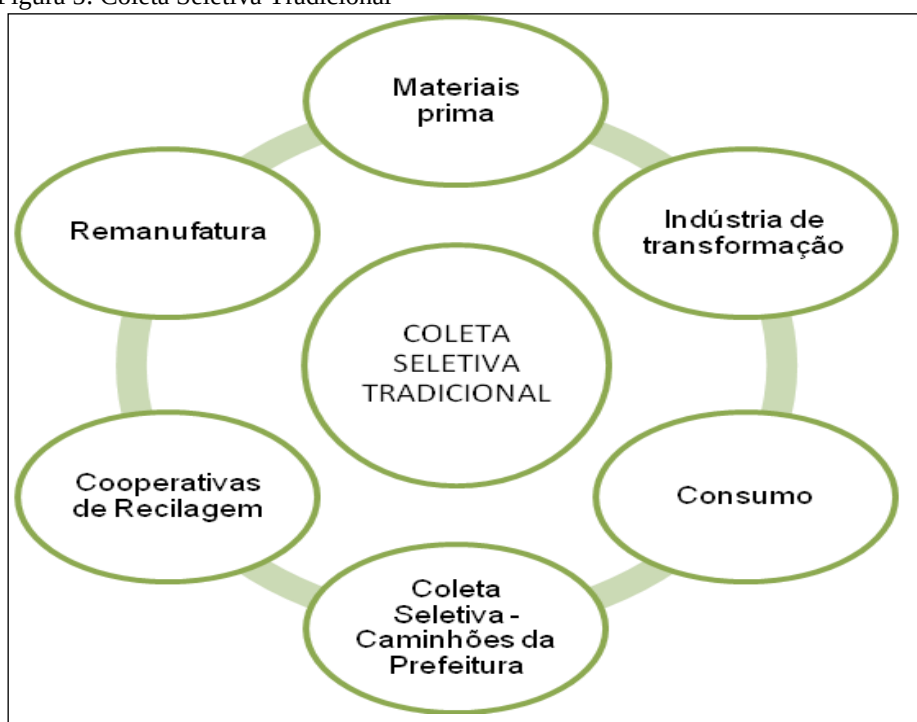
Neste contexto da PNRS, a atividade de reciclagem de embalagens dentro da cadeia de suprimento reversa torna-se muito relevante no estabelecimento de uma economia circular e na reinserção de materiais no ciclo produtivo, podendo ser acompanhada da criação de postos de trabalho, demonstrando assim uma sinergia

positiva entre esses conceitos: cadeia de suprimento reversa, economia circular e desenvolvimento industrial (NEVES, 2016).

Segundo Formigoni; Santos; Medeiros (2014) a coleta seletiva dos resíduos toma papel relevante para o estabelecimento da sustentabilidade no país, pois é o elemento mais frágil da cadeia de suprimentos reversa.

A Figura 5 representa o fluxograma da coleta seletiva tradicional. Esta figura demonstra o papel preponderante das prefeituras na captação e destinação para as cooperativas, porém estima-se que cerca de 49% dos resíduos de PET são descartados de maneira imprópria em ambientes a céu aberto (ABIPET, 2016a).

Figura 5: Coleta Seletiva Tradicional



Fonte: elaborado pelo autor

Diante do exposto, fica evidente a necessidade do engajamento de todas as partes envolvidas nesse processo para melhoria deste quadro. Com o agravante de que o PET não se deteriora facilmente no meio ambiente, e o seu descarte inadequado é um dos grandes desafios para gestão de resíduos sólidos, uma vez que é 100% reciclável, sendo possível seu retorno à cadeia produtiva (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Diversas são as implicações ambientais e socioeconômicas do descarte adequado do PET. Porém, a melhor solução depende dos critérios avaliados sobre a ótica da

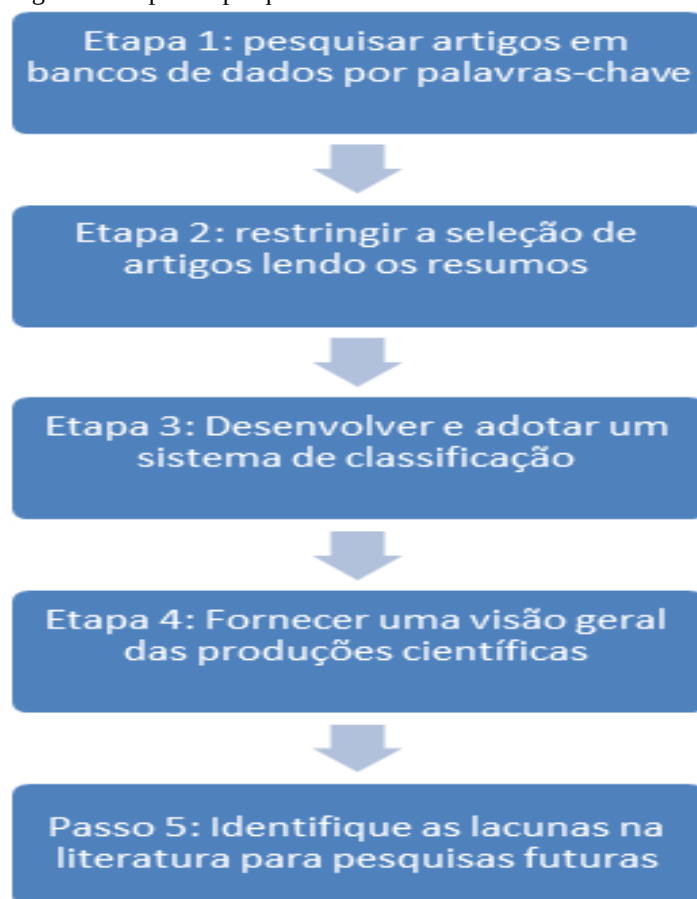
sustentabilidade do ciclo de vida do produto, com recorte para o seu ciclo no pós-consumo.

2.2.4 Revisão estruturada da literatura

O método de pesquisa utilizado foi uma revisão bibliográfica estruturada, por ser um método que objetiva reunir e avaliar as evidências disponíveis referentes a um tema específico.

Este trabalho de revisão estruturada utilizou a estrutura desenvolvida por Lage Junior e Godinho Filho (2010) e utilizada por Fiorini e Jabbour (2017), suas etapas são expressas através da Figura 6.

Figura 6: Etapas da pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

O cerne de investigação desta metodologia utiliza-se de uma questão central (BIOLCHINI et al., 2005), que no caso deste trabalho é:

- Quais estudos abordam o uso da avaliação do ciclo de vida para apoiar a gestão sustentável da cadeia de suprimentos reversa de garrafas PET?

Para responder essa questão foram realizadas buscas na base de dados Scopus. Na busca utilizou-se a combinação “PET” e “LCA” (ACV), “PET” e “Reverse Logistic” e “PET” e “Sustainability” para buscas no título, resumo e palavras-chave. Para filtrar os artigos encontrados foi determinado um critério de inclusão (CI), que foi utilizado para selecionar somente os artigos que contribuíssem para uma resposta concreta para a questão central deste artigo.

O CI determinado foi: artigos que permitam identificar ações de gestão ambiental ou de sustentabilidade na aplicação da avaliação do ciclo de vida na cadeia de suprimentos reversa de garrafas PET.

Esta pesquisa foi realizada ao longo de 2017, sendo encerrada a inclusão de artigos em abril de 2018, resultando num total de 242 títulos, conforme é demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados preliminares da pesquisa do banco de dados – Abril/ 2018

Palavras chaves	Resultados encontrados (número de artigos)	Filtro - Artigos online e impressos
"PET" and "LCA"	111	
"PET" and "Reverse logistic"	14	6
"PET" and "Sustainability"	120	81
		(-36) duplicados
Total	242	98

Esta seleção foi reduzida a 98 títulos selecionando apenas artigos de periódicos online e impressos no período de 2013 a 2018. Na segunda etapa, os 98 artigos foram reduzidos através da leitura dos seus respectivos resumos, para avaliar se estavam enquadrados segundo os critérios estabelecidos (CI).

Foram selecionados 21 artigos, e adicionado mais um artigo que não foi encontrado nas bases do Scopus. Esse artigo foi identificado através dos referenciais bibliográficos dos artigos selecionados. Totalizando assim, 22 artigos selecionados (Tabela 2).

Vale ressaltar que os artigos que não abordaram o uso da ACV para apoiar a gestão ambiental ou a sustentabilidade da cadeia de embalagens do PET e aqueles que não estavam disponíveis para leitura completa foram eliminados.

Tabela 2: Número Final de artigos selecionados

Artigos identificados em banco de dados Scopus	98
Artigos selecionados após leitura dos resumos	21
Artigos selecionados fora da revisão estruturada	01
Total	22

Após a seleção final dos artigos, estes foram classificados em oito dimensões, conforme o *framework* adaptado de Fiorini e Jabbour (2017). Estas dimensões foram categorizadas utilizando-se uma combinação de números e letras conforme a descrição a seguir. (Tabela 03).

- Classificação 1 refere-se ao contexto em consideração e foi categorizada: País desenvolvido (A), País em desenvolvimento (B) e Não aplicável (C).
- Classificação 2 indica o enfoque do artigo, que relaciona a avaliação do ciclo de vida: aspectos de sustentabilidade (A), apenas em aspectos ambientais (B), cadeia de suprimentos em geral (C). Quando a Avaliação do Ciclo de Vida não era o foco principal do estudo, o artigo foi codificado como (D).
- Classificação 3 está relacionada ao método de pesquisa e foi categorizada usando os códigos de letra A – D, onde: Estudo de caso (A), *Survey* (B), Multicritério (C) e Não aplicável (D).
- Classificação 4 refere-se ao setor em análise (A – D): Fabricação (A), Serviços (B), Outros (C) e Não aplicável (D)
- Classificação 5 indica os beneficiários da ACV na cadeia de suprimentos da garrafa PET: a organização local (A), fornecedores (B) ou várias partes interessadas “*stakeholders*” (C).
- Classificação 6 identifica os setores onde foi aplicada a ACV (Avaliação do Ciclo de Vida): Extração da matéria prima (A), Produção da resina PET (B), Fabricante de Embalagens PET (C), Engarrafadores de bebidas (D), Distribuição - mercados(E), Consumidor (F) e Coleta Resíduo (G).
- Classificação 7 aponta os tipos de reciclagem considerada dentro da aplicação da ACV: Disposição Final (A), Recuperação de Energia (B), Aplicação em outras indústrias (C).

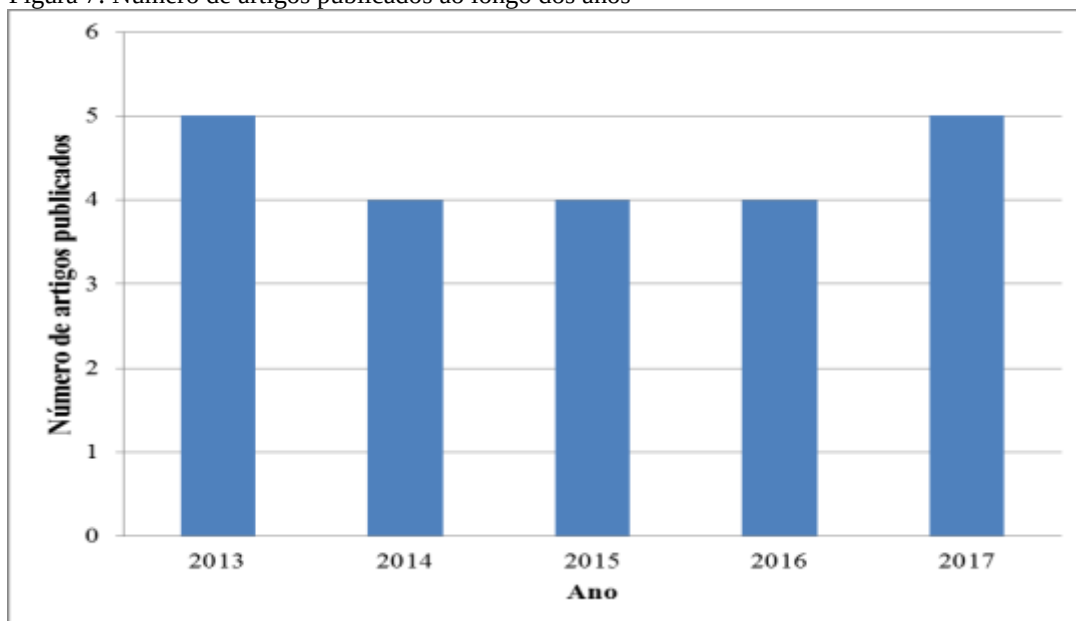
- Por fim, a classificação 8 teve como objetivo identificar o desempenho organizacional, compilando as áreas operacional, financeira, ambiental e social: Operacional (A), Financeira (B), Environmental (C) e Social (D).

Por meio da classificação dos artigos nas categorias descritas foi possível construir um mapa geral das produções científicas, possibilitando a identificação de lacunas e de oportunidades de pesquisa

2.2.4.1 Resultados da Análise Bibliométrica

Observa-se na Figura 7, a representação do número de artigos publicados nos anos de 2013 a 2017. Constata-se que o número de publicações sobre a temática analisada ainda é pequeno, porém constante, mostrando a relevância do assunto abordado (gerenciamento ambiental, sustentável da cadeia de embalagens do PET). O período analisado foi de 6 anos, porém, não foram encontrados artigos do ano de 2018.

Figura 7: Número de artigos publicados ao longo dos anos



Fonte: elaborado pelo autor

O Quadro 1 apresenta a descrição das oito classificações empregadas apontando seus significados e categorias e de codificações. Já a Tabela 3 apresenta a classificação dos artigos selecionados conforme estas categorias elencadas por meio do Quadro 1.

Quadro 1: Categorias para classificar e codificar os artigos analisados

Class.	Significado	Categorias de codificação
1	Contexto	A - País desenvolvido
		B - País em desenvolvimento
		C - Não aplicável
2	Foco	A - Avaliação do ciclo de vida e aspectos de sustentabilidade
		B - Avaliação do ciclo de vida e aspectos ambientais
		C - Avaliação do ciclo de vida e cadeia de abastecimento em geral
3	Método de pesquisa	A - Estudo de Caso
		B – Survey
		C - Multimétodo
		D - Não aplicável
4	Áreas analisadas	A – Fabricação
		B - Serviços
		C - Outros
		D - Não aplicável
5	Benefícios da integração	A - Organização focal
		B - Fornecedores
		C - Várias partes interessadas
6	Setores aplicação ACV	A-Extração da matéria prima
		B - Produção da resina PET
		C - Fabricante de Embalagens PET
		D - Engarrafadores de bebidas
		E - Distribuição (mercados)
		F – Consumidor
		G - Coleta Resíduo
		H - Não aplicável
7	Tipos de reciclagem	A - Disposição Final (aterro)
		B - Recuperação de Energia
		C - Mecânica
		D - Química
		E - Não aplicável
		F- Aplicação em outras indústrias
8	Benefícios de desempenho	A - Operacional
		B – Financeiro
		C – Ambiental
		D – Social

Tabela 3: Classificação e codificação dos estudos analisados

Autores	Ano	Contexto Nacional	Foco	Método	Área analisada	Benefícios da integração	Setores aplicação ACV	Tipos de reciclagem	Benefícios de desempenho
Navajas et al.	2017	1A	2B, 2C	3A	4A	5C	6H	7E	8C
Van Uytvanck et al.	2017	1A	2A	3A	4A	5C	6A, 6B, 6C, 6D, 6E	7E	8B, 8C
Aganovic et al.	2017	1A	2B	3A	4A	5A	6C	7E	8C
Hottle et al.	2017	1A	2B	3A	4A, 4B	5C	6B, 6G	7A, 7B, 7C, 7D	8B, 8C
Accorsi et al.	2015	1A	2B	3A	4A, 4B	5C	6D, 6E, 6G	7A, 7B, 7C, 7D	8C
Elduque et al.	2015	1C	2B	3A	4A	5A	6C	7E	8C
Ingrao et al.	2014	1A	2B	3A	4A	5C	6G	7C, 7F	8C
Akanuma et al.	2014	1A	2B	3A	4A	5C	6A, 6B	7E	8C
Foolmaun e Ramjeeawon	2013b	1B	2A	3C	4A	5A	6G	7A, 7B, 7C	8B, 8C, 8D
Foolmaun e Ramjeeawon	2013a	1B	2A	3C	4A	5A	6G	7A, 7B, 7C	8C, 8D
Kuczynski e Geyer	2013	1A	2B	3A	4A, 4B	5A	6G	7A, 7C	8C
Amienyo et al.	2013	1A	2B	3A	4A	5C	6C, 6D, 6E	7A, 7C	8C
Kang et al.	2017	1A	2A	3A	4A, 4B	5C	6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F, 6G	7A, 7B, 7C, 7D	8A, 8B
Chen et al.	2016	1A	2B	3A	4A	5C	6A, 6B, 6C	7E	8C
Saleh	2016	1B	2B	3A	4A	5C	6C, 6D, 6E, 6F	7A	8C
Leejarkpai et al.	2016	1B	2B	3A	4A, 4B	5C	6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F, 6G	7A, 7C, 7D	8C
Ingrao et al.	2016	1A	2A	3A	4A	5A	6H	7F	8A, 8C
Manfredi e Vignali	2015	1A	2A	3A	4A	5C	6C, 6D	7A, 7B, 7C, 7D	8A, 8C
Van Uytvanck et al.	2014	1A	2A	3A	4A	5C	6B, 6C	7E	8B, 8C
Papong et al.	2014	1B	2A	3A	4A	5C	6A, 6B, 6C	7A, 7B	8A, 8B, 8C
Toniolo et al.	2013	1A	2B	3A	4A	5C	6C, 6D, 6E, 6F	7A, 7B, 7C	8C
Park e Gupta	2015	1B	2A	3A	4B	5C	6G	7B, 7C	8A, 8B, 8C, 8D

No ano de 2013 observou-se um pico de publicações, destacando-se:

- O estudo de Foolmaun e Ramjeawon (2013a) que aplicou a ACV em quatro cenários de reciclagem, consideraram as variáveis ambientais e sociais. No mesmo ano os autores publicaram um segundo trabalho integrando a variável econômica, social, usando a processo de análise hierárquica (FOOLMAUN; RAMJEAWON, 2013b).
- Já Kuczenski e Geyer, 2013 e Amienyo et al. (2013) focaram na aplicação pura da ACV no desempenho ambiental. O mesmo aconteceu com Toniolo et al. (2013) que apesar de apontar um caminho para a sustentabilidade, teve como foco apenas os impactos ambientais.

De 2014 em diante houve a aplicação da ACV em conjunto com aspectos financeiros e sociais, porém nenhum método se consolidou ou se destacou como um padrão a ser utilizado.

Uma das formas mais comuns para avaliar o impacto e a importância de uma publicação científica é pelo seu número de citações. A Tabela 4 mostra os 10 artigos mais citados e suas citações totais na base de dados Scopus (FIORINI; JABBOUR, 2017).

Tabela 4: Os 10 artigos mais citados e suas citações totais na base de dados Scopus

Autores	Ano	Citações no Scopus
Foolmaun e Ramjeawon	2013a	50
Papong et al.	2014	43
Amienyo et al.	2013	31
Toniolo et al.	2013	21
Ingrao et al.	2014	20
Manfredi e Vignali	2015	17
Accorsi et al.	2015	16
Foolmaun et al.	2013b	13
Ingrao et al.	2016	12
Van Uytvanck et al.	2014	10

Observando os resultados da tabela 4 pode-se entender a maior relevância dos artigos enxergando as principais descobertas de cada um:

- Foolmaun e Ramjeawon (2013a) conseguiu modelar um sistema de avaliação de resíduos de PET na República de Maurício através da metodologia da ISO

14.040. Promovendo uma sequência de artigos com aplicação ACV Ambiental, Social e Econômica. O que trouxe muita visibilidade para esse trabalho.

- Papong et al. (2014) apresentou uma importante pesquisa realizando a comparação de garrafas PET com garrafas de PLA oriundas do amido de mandioca. Evidenciando o melhor desempenho do bioplástico PLA sobre as garrafas PET nas categorias de aquecimento global, redução da dependência de energia fóssil e toxicidade humana. Utilizando para isso toda a modelagem seguindo as diretrizes da ISO 14.040 através do o *software* Ecoinvent para a utilização do banco de dados
- Amienyo et al (2013) se destacou por fazer uma pesquisa pioneira e extensa. Este trabalho obteve uma análise do berço ao túmulo comparando diferentes embalagens utilizadas para bebidas gaseificadas: garrafas de vidro (0,75 l), latas de alumínio (0,33 l) e garrafas de tereftalato de polietileno (PET) (0,5 e 2 l). Este trabalho foi de grande valia para melhorar o bando de dados tanto do seu país de origem (Reino Unido) como para efeito comparativo em outras regiões.
- Toniolo et al. (2013) conseguiu mostrar em seus resultados de ACV a importância ambiental do processo de reciclagem de resíduos da PET. Evidenciando que a utilização de materiais reciclados combinados com aditivos específicos potencializa o desempenho ambiental. Mostrando que utilização da embalagem produzida com filme de um único material reciclável é melhor que as embalagens multicamadas para todas as categorias de impacto analisadas referentes ao aspecto ambiental.
- Ingrao et al. (2014) neste trabalho apresentou os benefícios ambientais oriundos da reciclagem de garrafas PET para a produção de flocos frente a outras opções de destinação, como aterro sanitário e incineração municipal. E este trabalho teve grande destaque principalmente pelo emprego pela reutilização do resíduo de garrafa PET na produção de painéis.
- Manfredi e Vignali (2015) demonstram uma análise focada na execução da ACV quanto ao desempenho ambiental de sistemas de envase a quente e sistemas de embalagem asséptica utilizados para bebidas. Desta maneira realizaram uma comparação entre as tecnologias de envase a quente apenas

no que diferenciava as tecnologias. Fato que deixou a análise mais enxuta, reduzindo se assim distorções de outros processos periféricos.

- Accorsi et al. (2015) realizou um estudo comparativo entre garrafas de azeite de oliva extra virgem em cadeias de abastecimento globais para os materiais de vidro e plásticos. E descobriu através da ACV a relevância do potencial das garrafas PET na redução do impacto ambiental das cadeias de abastecimento.
- Foolmaun e Ramjeawon (2013a) foi o último artigo sobre a avaliação do ciclo de vida na República Maurício. Teve grande repercussão pois conseguiu propor um modelo para integração da avaliação do ciclo de vida para os aspectos social, ambiental e econômica, utilizando a metodologia AHP.
- O trabalho de Ingrao et al. (2016) tem grande relevância pois realizou uma destinação do resíduo sólido na área da construção civil (paredes externas) demonstrando os respectivos impactos ambientais. Trabalhando assim na reinserção do resíduo de garrafas PET em uma nova cadeia de suprimento.
- A ACV conduzida por Van Uytvanck et al. (2014) foi de grande relevância pois demonstrou os diferentes impactos resultantes do polietileno tereftalato obtido através de petróleo e biomassa.

Na Tabela 5 destacam se os 9 autores com maior número de publicações. Observa-se que os demais autores tiveram apenas uma publicação. Destacou-se o pesquisador Rafael Auras que realizou publicações com grupos distintos, já os demais publicaram com os mesmos pesquisadores.

Rafael Auras pertence ao quadro de docentes da Universidade Estadual de Michigan onde estabeleceu parcerias no desenvolvimento do trabalho intitulado “Avaliação do ciclo de vida de garrafas de bebida não alcoólica de polietileno tereftalato de dose única no estado da Califórnia” com DongHo Kang (Afiliado da Universidade Estadual de Michigan e também pelo Instituto Coreano de Tecnologia Industrial,) e Jay Singh da Universidade estadual politécnica da Califórnia,

E também fez outro trabalho intitulado “Um estudo de caso preliminar de LCA: Comparação de diferentes vias para produzir ácido tereftálico purificado adequado para a síntese de PET 100% biológico” com os pesquisadores Yasuhiko Akanuma e Susan E. M. Selke (Universidade Estadual de Michigan).

Ambos os trabalhos oriundos da pesquisa de Rafael Auras são relevantes para estudos sobre a avaliação do ciclo de vida de resíduos de garrafa PET. E, também pode ser observado que as respectivas parcerias auxiliam na construção e disseminação sobre a gestão de resíduos.

Tabela 5: Autores com o maior número de publicações

Autores com o maior número de publicações.	Autor Número de artigos publicados
Foolmaun R.K.	2
Ramjeeawon T.	2
Ingrao C.	2
Tricase C	2
Van Uytvanck P.P.	2
Haire G.	2
Marshall P.J.	2
Dennis J.S.	2
Auras, R.	2

Os trabalhos de Foolmaun R. K. e Ramjeawon T. fazem parte da pesquisada Faculdade de Engenharia da Universidade de Maurício, e tiveram essas duas publicações referente a continuidade entre os trabalhos. O primeiro trabalho objetivou verificar a melhor rota de destinação de resíduos de PET com relação aos aspectos ambientais e sociais, utilizando a ferramenta de avaliação do ciclo de vida (Foolmaun e Ramjeawon (2013a). Já o segundo trabalho incluiu o aspecto econômico nesta análise, fazendo uma avaliação integrada entre os três pilares: Ambiental, Social e Econômica, Foolmaun e Ramjeawon (2013a).

Ingrao C. e Tricase C. realizaram seus trabalhos em conjunto e aplicaram a ACV para pesquisas na construção civil. O primeiro trabalho Ingrao et al. (2014) versou sobre a utilização de resíduos de garrafa PET na construção de produção de painéis . Já o segundo trabalho utilizou resíduos de garrafa PET na construção de paredes externas.

Os autores Haire G., Marshall P.J., Dennis J.S. fizeram parte do mesmo grupo de pesquisa, trabalhando na utilização de material proveniente de biomassa e comparando com materiais tradicionais (petróleo versus etanol na produção de polietileno em Van Uytvanck et al. 2014 e biomassa: palha de milho, salgueiro e cana-de-açúcar versus nafta na produção de p-xileno), destacando as os impactos ambientais

2.2.4.1.1 Categorias Analisadas

Os artigos identificados e analisados neste trabalho estão compilados na Tabela 4. Já o apêndice traz uma sumarização das principais contribuições de cada um desses artigos para aplicação da ACV.

Contexto nacional

Apresenta-se 22 artigos selecionados sendo que 15 deles aplicaram a ACV em países desenvolvidos utilizando se dos bancos de dados da Europa, seguido de sete aplicações nos EUA. Os países em desenvolvimento tiveram apenas seis aplicações sendo 2 na República de Maurício, 1 na Palestina, 2 na Tailândia e 1 no Havaí.

Nenhum estudo foi realizado na África ou na América do Sul. Apenas um estudo utilizou-se de índices globais. A maioria dos estudos (Tabela 06) permeou o estudo da ACV em ambientes bem estreitos.

Analisando os artigos observa-se uma lacuna no emprego da ACV em países em desenvolvimento, apenas 27%. Saleh (2016) evidencia que apesar da ACV ser aplicada nas mais distintas geografias do planeta, o emprego em países em desenvolvimento ainda é imaturo quanto a conscientização, regulação e controle de impactos ambientais.

Foolmaun e Ramjeawon (2013a) incentiva a utilização da ferramenta como forma de melhorar a gestão de resíduos sólidos em países em desenvolvimento. Essas informações levaram a seguinte recomendação:

R1 – Promover um número maior de estudos em países em desenvolvimento, integrando diferentes abordagens de reciclagem entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Assim integrando vários contextos distintos dentro da sustentabilidade: Financeira, Ambiental e Social.

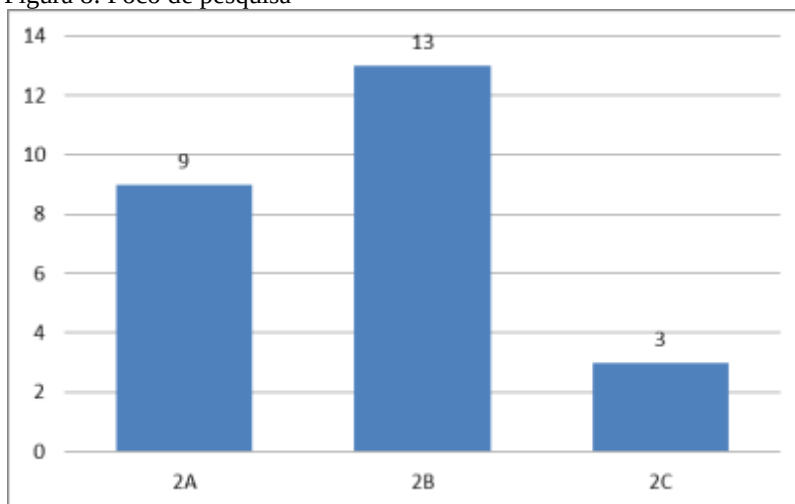
Tabela 6: Frequência de artigos classificados por contexto

	Frequência	Frequência [%]
A - País desenvolvido	15	68%
B - País em desenvolvimento	6	27%
C - Não aplicável	1	5%
Total	22	

Foco de pesquisa

Esta apreciação teve como escopo averiguar o foco dos artigos. A maior parte dos artigos foi qualificada como categoria B (13 artigos, 59,1%), ou seja, os artigos centraram seus esforços nos aspectos ambientais na cadeia de suprimentos (Figura 8).

Figura 8: Foco de pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor

Isto era esperado, posto que a ferramenta ACV tem sua aplicação direta na averiguação dos impactos ambientais. Observa-se que apenas 9 artigos consideram a utilização combinada da ACV com outras ferramentas. E apenas 2 trabalhos consideraram a aplicação geral da ACV na cadeia de abastecimento em geral. Desses dois trabalhos detalha-se:

- Ingrao et al. (2014) utilizou a aplicação para o abastecimento geral da cadeia de suprimentos inclusive de outras indústrias abordando a produção de painéis à base de fibra de PET reciclada para isolamento térmico de edifícios: Impacto ambiental e avaliação do potencial de melhoria para uma produção mais ecológica.
- Em outro estudo, Ingrao et al. (2016) observou-se a mesma aplicação no abastecimento geral da cadeia de suprimentos aplicando a utilização de resíduos de PET na composição externa de paredes na construção civil.

Apesar dos trabalhos de Ingrao et al. (2014 e 2016) associarem o retorno dos resíduos de garrafa PET a reutilização na indústria civil. Não foram identificadas

pesquisas que tratem esse assunto sob a ótica da economia circular, fato esse que levou a elaboração da segunda recomendação:

R2 – Verificar a associação direta entre a economia circular dentro da cadeia do PET, buscando uma análise que dê retorno dos resíduos de PET às cadeias de produtos existentes.

Métodos de pesquisa

A apreciação das metodologias empregadas revela que a maioria dos artigos focou na avaliação do ciclo de vida com viés ambiental ou sustentável. São estudos quantitativos em conjunto com estudos de casos (86%), seguidos de estudos multimétodo (9%), conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7: Frequência dos artigos classificados pelo método de pesquisa.

Categoria	Frequência	Frequência [%]
Estudo caso	20	86%
Multimétodo	2	9%
Total	22	

Pode-se verificar na Tabela 7 que houve uma predominância na abordagem de estudo de caso com a utilização da ISO 14040 e ISO 14044 para avaliar predominantemente os aspectos ambientais (91%). E a utilização do método multimétodo (9%) para a integração entre os pilares da sustentabilidade. Estes trabalhos com utilização de abordagem multimétodo foram conduzidos por Foolmaun e Ramjeawon durante o ano de 2013.

A seguir são descritas as principais considerações quanto à metodologia empregada nos trabalhos classificados através da Tabela 7 e apontados como os mais relevantes pela Tabela 04:

- O trabalho de Foolmaun e Ramjeawon (2013a) utiliza-se da abordagem de multimétodos com a utilização das normas ISO 14040 e ISO 14044 para roteirizar de destinação final de resíduos de garrafa PET para os impactos ambientais e sociais (Este último contou com o complementos das diretrizes da UNEP/SETAC (2009 e 2013).

- Em seu último trabalho Foolmaun e Ramjeawon (2013b) utiliza-se da abordagem multimétodo para mensuração dos impactos sociais, ambientais e econômicos, com a agregação e ponderação multicritério através do AHP.
- E os trabalhos de Navajas et al. (2017), Aganovic et al. (2017), Accorsi et al. (2015), Elduque et al. (2015), Akanuma et al. (2014), Kuczenski e Geyer (2013), Amienyo et al. (2013), Chen et al. (2016), Saleh (2016), Leejarkpai et al. (2016), Ingrao et al. (2014), Papong et al. (2014) e Toniolo et al. (2013), utilizam a abordagem de estudo de caso fundamentados pela normas ISO 14040 e ISO 14044 para realizar a ACV com foco exclusivo sobre o aspecto ambiental.
- Por fim, os trabalhos de Van Uytvanck et al. (2017), Hottle et al. (2017), Kang et al. (2017), Ingrao et al. (2016), Manfredi e Vignali (2015), Van Uytvanck et al. (2014), e Park e Gupta (2015), fazem uso de estudos de área através ISO 14040 e ISO 14044 para realizar a ACV ambiental, porém incluem análises mais superficiais quanto aos outros pilares da sustentabilidade.

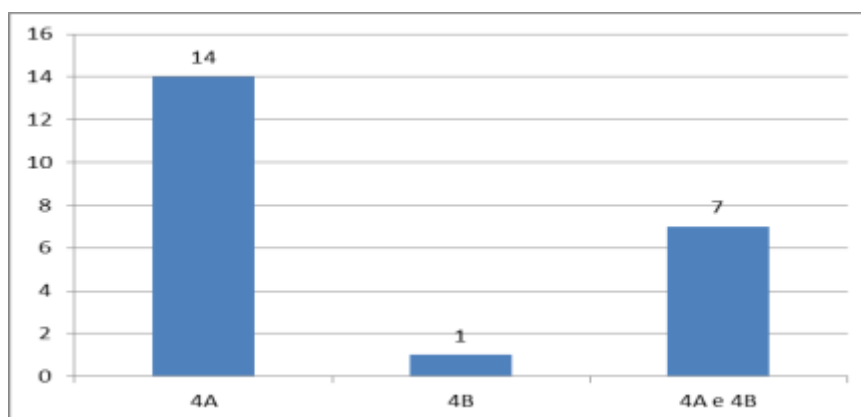
Pode ser observado que todos esses trabalhos apresentados utilizam as normas ISO 14040 e ISO 14044 como base metodológica para aplicação da avaliação do ciclo de vida. E observa-se pela natureza dessa norma que uma predominância na abordagem de estudo de caso. Foolmaun e Ramjeawon (2013b) indicou o uso de abordagem multimétodos para realizar ACV nos diversos pilares e a respectiva integração pelo multicritério.

R3 —Recomenda-se empregar a técnica estudo de caso para avaliar os impactos do sistema sob a ótica da ISO 14040 e ISO 14044 para aspectos ambientais e esse mesmo conjunto de normas em consonância com as diretrizes da UNEP/SETAC (2009, 2013) para o aspecto social, realizando a integração das ACV pela abordagem multicritério.

Setor analisado

A análise dos dados mostrou que 77% dos artigos selecionados, ou seja, 17 dos 22 artigos selecionados tiveram aplicações de ACV focada nas etapas de fabricação, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9: Setor analisado



Fonte: elaborado pelo autor

Apenas o trabalho de Park e Gupta (2015) concentrou-se na aplicação da ACV, exclusivamente, na etapa de serviço caracterizada pela coleta seletiva e no estabelecimento de duas de reciclagem pós consumo de PET em Honolulu, Havaí. Quatro artigos focaram nas etapas de fabricação e serviço: Kang et al. (2017) e Leejarkpai et al. (2016) fizeram uma análise mais abrangente do berço ao túmulo comparando os efeitos da utilização da PET com plásticos. Já os trabalhos de Hottle et al (2017) e Accorsi et al. (2015) fizeram uma análise mais estreita em um número menor de processo. Analisando estes artigos, existe um emprego diverso quanto à utilização os tipos de transporte durante a coleta dos resíduos. Isto deve ser vinculado a disponibilidade local desses modais. Kuczenski e Geyer (2013) utiliza os modais de rodoviário e ferroviário em seus cenários de coleta e destinação final. Já Hottle et al. (2017) utiliza os transportes rodoviário e aquaviário. Enquanto que Foolmaun e Ramjeawon (2013a, 2013b) considerou constante distância entre coleta e transporte aos cenários de destinação final, o autor não faz menção ao modal escolhido. Park e Gupta (2015), transporte aquaviário reciclagem. Porém, nesse trabalhos não se faz a menção a estratégias de coleta através de ponto fixo (onde os moradores levam diretamente os resíduos a estação de tratamento ou a um ponto intermediário que visa encurtar as distâncias e a emissão de CO₂), apenas o trabalho de Park e Gupta (2015) faz uso dessa prática. Destas análises surge a recomendação:

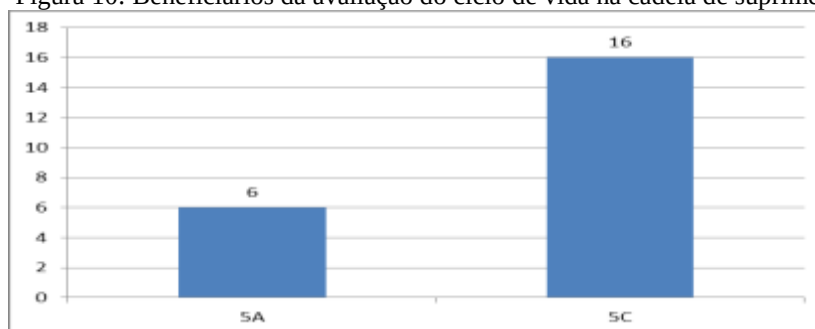
R4 – Utilizar a avaliação do ciclo de vida para quantificar cenários de coleta seletiva, além da etapa de transporte. Como por exemplo, a estocagem intermediária ao longo do processo: Ecoponto e ponto fixo.

Beneficiários da avaliação do ciclo de vida na cadeia de suprimentos

Esta análise teve como objetivo identificar os setores que se beneficiaram da integração das avaliações realizadas sobre os sistemas estabelecidos, conforme mostra a Figura 10. Observou-se que 73% (16 de um total de 22 artigos) centraram em uma análise mais global, focando em mais de um elemento da cadeia do PET, buscando demonstrar os impactos no recorte estabelecido (Figura 10).

Apenas 6 artigos (28%) tiveram uma análise centrada em apenas um elemento da cadeia produtiva do PET, estabelecendo assim uma análise focada para cada um dos itens, porém em cenários distintos.

Figura 10: Beneficiários da avaliação do ciclo de vida na cadeia de suprimentos



Fonte: elaborado pelo autor

Deste modo, pode-se observar que como a avaliação de ciclo de vida utiliza-se de bancos de dados coletivos para realizar sua aplicação e diversos trabalhos apresentam aplicações globais, e algumas análises em dados primários. Surge a seguinte recomendação:

R5 – Comparar o valor local dos valores encontrados na ACV referente aos dados primários com os valores disponibilizados em banco de dados consolidados, e assim criar uma normalização para os demais itens do sistema analisado. E, só então realizar a análise do sistema.

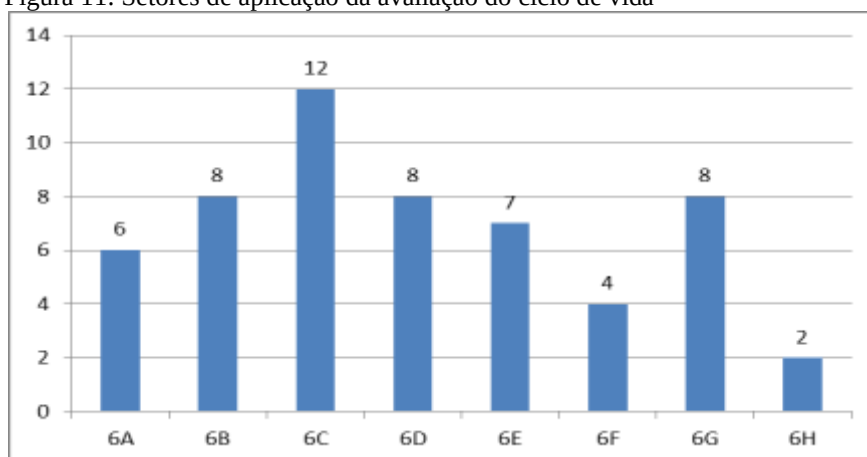
Setores de aplicação da avaliação do ciclo de vida

Nessa categoria observaram-se os setores onde foi realizada a ACV, conforme mostra a Figura 11. As etapas mais abordadas na ACV foram os Fabricantes de

Embalagens PET (54,4%), seguida da Produção da resina PET, Engarrafadores de bebidas, Coleta de resíduo (34,4%). Observa-se que:

- Kangas et al. (2017) trabalhou um sistema de coleta descentralizado para processamento em um centro de reciclagem coletivo, utilizou dados secundários para os processos de coleta e destinação final.
- Leejarkpai et al. (2016) utilizou dados primários para coleta e destinação de fim de vida, apontando os inventários das transportes de caixas usadas (PS, PET e PLA). Onde as emissões totais de GEE durante o gerenciamento de resíduos foram determinadas a partir da soma das emissões de GEE durante o transporte e descarte de resíduos.
- Park e Gupta (2015) verificaram os dois caminhos de reciclagem das garrafas de tereftalato (PET) originárias da cidade de Honolulu, Hawaii: incineração local e a reciclagem transcontinental. Esse trabalho utilizou dados mistos na etapa de coleta e destinação final, pois e os autores salientam a coleta de dados se deu por entradas obtidas através de entrevistas e dados secundários coletados em relatórios do governo e na literatura.
- Kuczenski e Geyer (2013), Hottle et al. (2017) e Accorsi et al. (2015) utilizaram dados secundários na etapa de coleta e destinação final.
- Ingrao et al. (2014) considerou a etapa de coleta seletiva para reciclagem das garrafas PET em fibras de PET. Utilizando dados primários.
- Nos dois estudos de Foolmaun e Ramjeawon (2013) foram considerados dois cenários hipotéticos e dois cenários existentes. Onde foram utilizados dados mistos (primários e secundários).

Figura 11: Setores de aplicação da avaliação do ciclo de vida



Fonte: elaborado pelo autor

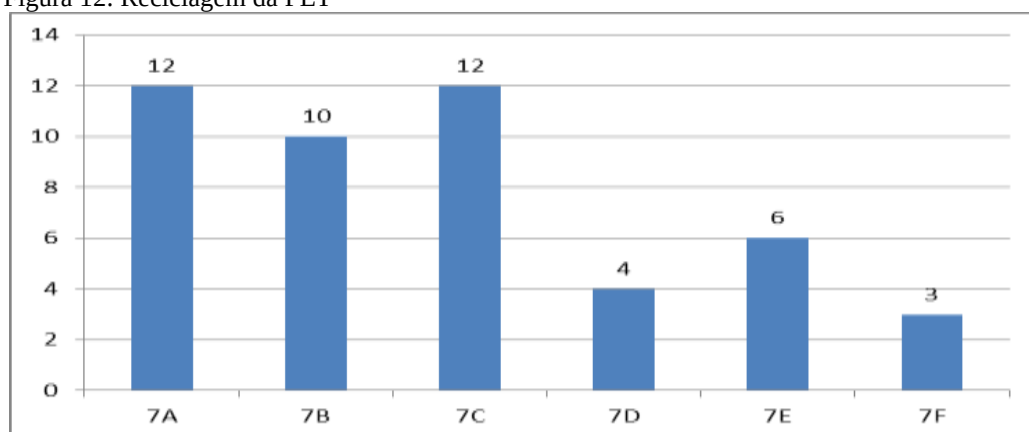
Após a análise dos artigos, observou-se que poucos trabalhos utilizaram dados primários (INGRAO et al., 2014), (LEEJARKPAI; MUNGCHAROEN; SUWANMANEE, 2016) quanto à coleta seletiva e os compararam com os dados dos demais processos envolvidos. Porém essa prática foi valorizada nos outros trabalhos os quais apontam a utilização de dados secundários pela dificuldade em colher os dados primários, ou mesmo pela extensão da pesquisa (berço ao túmulo). Logo, vem à sexta recomendação:

R6 – Recomenda-se utilizar dados primários na etapa de coleta seletiva, posto que eles são a porta da reciclagem e diferentes maneiras de coletar podem influenciar nos impactos sobre o sistema.

Reciclagem da PET

Nesta etapa foram categorizados os tipos de reciclagem abordados nos estudos da avaliação do ciclo de vida em torno das garrafas de PET: Disposição Final (aterro), Recuperação de Energia, Mecânica, Química, Aplicação em outras indústrias e Não aplicável - os artigos que não realizaram ou não descreveram o processo de reciclagem em seu inventário foram incluídos nessa categoria (Figura 12).

Figura 12: Reciclagem da PET



Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se que a disposição final e a reciclagem mecânica são os processos mais utilizados nos cenários abordados nos estudos. E que a recuperação de energia pela incineração dos resíduos de PET é recorrente. Apenas 4 estudos trabalharam com a reciclagem química demonstrando os tratamentos necessários para o reaproveitamento por meio de equacionamento das reações. Apenas 3 trabalhos utilizaram a ACV focada

na aplicação em outras indústrias. Outros artigos estudaram a aplicação na indústria de tecido de PET e na construção civil de painéis (INGRAO et al., 2014, 2016). Desta análise surge a sétima recomendação:

R7 – Vincular a aplicação aos tipos de reciclagem às aplicações dos materiais reaproveitados, favorecendo assim a avaliação do ciclo de vida e a economia circular.

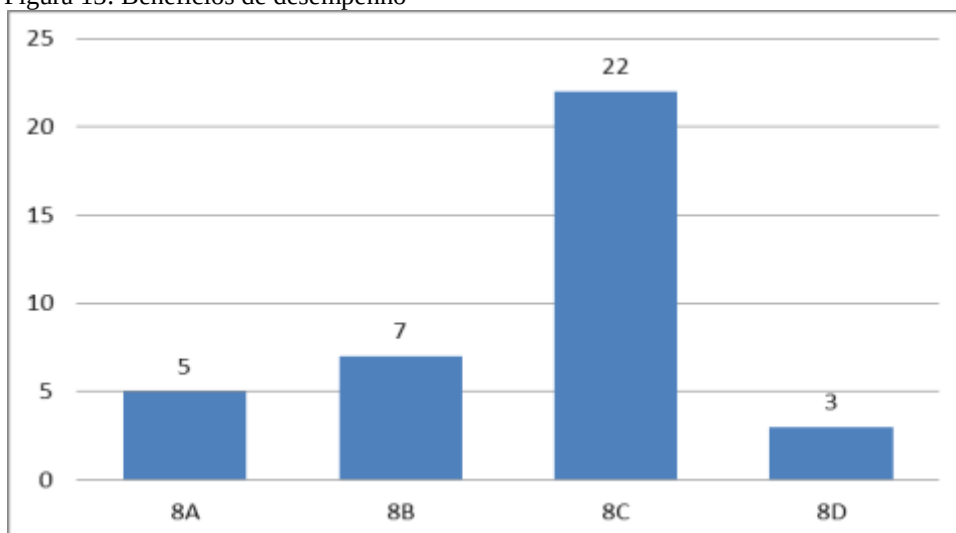
Benefícios de desempenho

Em análise ao desempenho do sistema avaliado observou-se que os sistemas que tiveram benefícios além do ambiental utilizaram técnicas para identificar os benefícios de cunho econômico, social, e operacional (Figura 13).

A análise mostra que todos os artigos que utilizaram a ACV comprovaram benefícios ambientais oriundos das análises realizadas. E que a variável econômica é a segunda mais utilizada para complementar a ACV (7 artigos - 31,8%). Apenas 5 artigos conseguiram demonstrar os benefícios operacionais e 3 os benefícios sociais. Desta análise surgiu a última recomendação:

R8: Utilizar metodologias que integrem os indicadores social, operacional, financeiro e ambiental de modo a agregá-los em indicadores globais do sistema, para assim consolidar análises de sensibilidade que possam mensurar o peso de cada área de maneira quantitativa.

Figura 13: Benefícios de desempenho



Fonte: elaborado pelo autor

2.2.4.2. Discussões

Nesses últimos seis anos, os dados pesquisados mostraram-se reduzidos, porém com um perfil constante de publicação indicando a necessidade de mais estudos nessa temática. A grande maioria dos estudos ainda foca exclusivamente em aspectos ambientais o que deixa os aspectos de integração social, financeiro e operacional de maneira insipiente, merecendo mais atenção (FIORINI e JABBOUR, 2017).

Observam-se poucos métodos de integração dos diferentes aspectos na análise da cadeia de suprimentos do PET, como o método de ACV usando a Análise Hierárquica do Processo (AHP) utilizado por Foolmaun e Ramjeawon (2013b). Porém, o que foi constatado é a utilização de meios de integração pulverizados e não consolidados. O que norteia a busca do estabelecimento de métodos de mensuração mais robustos e aplicáveis.

A maioria dos artigos estava concentrada na Europa e nos Estados Unidos, além de algumas publicações em outros países como República Maurício, Palestina, Tailândia e Havaí respectivamente Foolmaun e Ramjeawon (2013); Saleh (2016), Leejarkpai; Mungcharoen; Suwanmanee (2016); Papong et al. (2014) e Park e Gupta (2015). Porém, existe a necessidade de expandir os estudos a países em desenvolvimento. Nota-se que nenhum estudo foi realizado na África ou América do Sul. Apenas um estudo utilizou-se de índices globais.

Logo, se torna necessário o estabelecimento de estudos de avaliação do ciclo de vida que incluam em suas fronteiras as relações entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento (principalmente do hemisfério sul). Assim, potencializando a consolidação sustentável da cadeia de suprimentos sustentável do PET.

Outro ponto que se destaca é que nenhum artigo utilizou-se das abordagens survey; e raros trabalhos utilizaram multimétodo ((FOOLMAUN; RAMJEEAWON, 2013a, 2013b). Persistindo uma predominância sobre aplicação da ACV no aspecto ambiental. Discussões sobre a base conceitual da integração dos aspectos do tripé ambiental são necessárias, a título qualitativo mais também a representação quantitativa, para embasar o estabelecimento de métodos de análise.

Predomina-se de maneira preponderante a análise da coleta de resíduos focada apenas no transporte rodoviário. Fato que pode ser ampliado para outras maneiras de coletar e os resíduos, como o transporte dutoviário de Barcelona, Espanha. Além disso, os dados utilizados na ACV, em sua grande maioria, foram relacionados a bancos de

dados europeus e não apresentam um fator de normalização robusto para a agregação dos dados primários obtidos. Recomenda-se utilizar dados primários na etapa de coleta seletiva, pois é um setor pouco estudado, sendo que sua aplicação, até o momento, centra-se no estudo do transporte rodoviário entre material pós-consumo e processos de fim de tubo. Sendo assim, os impactos ambientais podem ser influenciados pelo surgimento de novas maneiras de coletar os resíduos.

Outro ponto que pode potencializar a ACV é atrelar a aplicação dos tipos de reciclagens às aplicações dos materiais reaproveitados em novos produtos, o que incentiva a economia circular.

Além disso, pode-se observar que a ACV influencia positivamente o desempenho operacional, mostrando novas alternativas de materiais, com possibilidade de mensurar o impacto financeiro e social dessas alternativas. Entretanto, o impacto do uso integrado da ACV com outras ferramentas ainda não está consolidado.

Portanto, novos estudos são necessários para que seja amadurecida a temática indagada, e estas questões levaram às recomendações colocadas neste estudo. Uma compilação das recomendações metodológicas para aplicação da avaliação do ciclo de vida é fornecida no Apêndice A1.

2.2.5 Considerações deste capítulo

Este trabalho objetivou efetuar uma revisão estruturada sobre artigos acadêmicos que tratam sobre a aplicação da avaliação do ciclo de vida e gestão sustentável da cadeia produtiva da garrafa PET. Com isso foram analisados 22 artigos publicados nos últimos seis anos e, a partir da análise de diferentes categorias, foi fornecido um mapeamento das publicações selecionadas. A classificação foi dividida em: contexto da pesquisa, foco da pesquisa, método de pesquisa, setor de analisado, benefícios da integração, setores de aplicação da ACV, tipos de reciclagem e benefícios de desempenho.

É relevante salientar que somente os artigos que continham as palavras-chave relacionadas à gestão ambiental, sustentabilidade da cadeia de suprimentos do PET foram avaliados.

Conclui-se que a ACV é uma ferramenta útil, que pode ser usada para avaliar a sustentabilidade da garrafa PET. Pois, pode auxiliar na mensuração ambiental de alternativas de produção e descarte final, e na avaliação dos benefícios às empresas locais, fornecedores e demais partes interessadas de cada alternativa. Fornecendo assim,

um apoio a comparações relevantes no tocante a análise de desempenho operacional, financeiro e ambiental. No entanto, ainda são necessários mais avanços sobre o tema, no quesito agregar os componentes de desempenho ambiental, operacional, financeiro e social.

Contribuições relevantes dessa pesquisa foram colocadas como recomendações em cada categoria analisada. Essas recomendações podem ser entendidas como oportunidades para novas pesquisas sobre a temática. Essas recomendações serão utilizadas para a realização da Avaliação do Ciclo de Vida (Capítulo 3), Avaliação do Ciclo de Vida Social (Capítulo 4) e na Integração Socioambiental entre os sistemas das ACV e ACVS das destinações do ciclo de vida garrafa PET (Capítulo 5).

3. AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO DESCARTE DA GARRAFA PET

O capítulo 3 foi publicado no periódico *Waste Management* com o Título “*Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of Bauru, Brazil*” (MARTIN et al., 2021). Os dados completos contendo seus dados e associações foram divulgados no periódico *Data in Brief* 2020 com o título “*Dataset for life cycle assessment of pet bottle waste management options in Bauru, Brazil* (MARTIN et al., 2020).

3.1 INTRODUÇÃO

Em uma economia orientada para o aumento do consumo e focada no consumidor e no lucro, faz com que, na maioria das vezes, a expansão da produção nas indústrias não acompanhe o desenvolvimento de políticas ambientais que mitiguem os impactos negativos advindos desse aumento da produção. Igualmente preocupantes são os impactos decorrentes do uso e destinação final dos produtos fabricados, principalmente de produtos plásticos.

Com o uso generalizado de plásticos em materiais cotidianos, torna-se particularmente importante estudar os efeitos ambientais e de saúde associados à indústria de plásticos. Um tipo de plástico que se tornou extremamente popular é o tereftalato de polietileno (PET), que tem ampla utilização nas indústrias de bebidas e têxteis. Em 2017, foram produzidos 30,3 milhões de toneladas de PET no mundo, sendo que mais de 50% das fibras sintéticas e garrafas produzidas utilizaram o PET como matéria prima (PLASTICS INSIGHT, 2019). O PET é amplamente atraente devido à sua durabilidade, resistência, estabilidade, baixa permeabilidade (o que o torna seguro para conter alimentos) e facilidade de processamento e manuseio (WEBB et al., 2013).

A produção tradicional de PET é mais comumente realizada pela reação de etileno-glicol (EG) com ácido tereftálico purificado (ATP) em uma reação de transesterificação, seguida por uma série de etapas de polimerização, cujo número depende do peso molecular necessário para a aplicação (WEBB et al., 2013). Para produzir resinas PET de grau alimentício, uma etapa adicional de polimerização em fase sólida é necessária (WEBB et al., 2013); (KÄGI et al., 2017). As resinas são então aquecidas e fundidas para dar a forma desejada por meio de extrusão, injeção ou moldagem por sopro. Foi relatado que a produção de um kg de resina PET requer de 70

a 83 MJ de energia térmica (GLEICK; COOLEY, 2009) e libera 2,44 kg CO₂ e para a atmosfera (WEBB et al., 2013). Além disso, os produtos químicos utilizados para produzir a resina de PET são de base fóssil (BENAVIDES et al., 2018). O TPA é produzido pela oxidação do paraxileno com ácido acético e a produção de EG começa com o etileno (BENAVIDES et al., 2018).

Apesar da robustez e durabilidade do PET, a fase de uso desse material costuma ser curta, e as mesmas qualidades que o tornam atraente como material de embalagem também o tornam extremamente resistente à degradação química, quando descartado. Essa resistência à degradação, associada a altos volumes de produção, torna a questão do descarte adequado do PET muito relevante (GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2019). Estudos mostram que, quando o PET é depositado em aterro, apenas 1 a 5% do carbono do plástico se degrada em 150 anos; e o carbono remanescente pode levar milhares, ou talvez milhões de anos para ser liberado (SUNDQVIST, 1999). Além disso, as garrafas PET podem liberar compostos orgânicos voláteis tanto para o ar quanto para a água (lixiviado), quando depositadas em aterro (WEBB et al., 2013).

Investigar a fase pós-consumo das garrafas PET é importante, pois aborda as questões relacionadas (1) ao processo de produção do PET fóssil, que pode ser evitado se os resíduos de PET forem recuperados e reciclados e (2) à sua disposição final.

A logística reversa é definida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) brasileira como uma ferramenta para o desenvolvimento econômico e social, caracterizada por um conjunto de ações, procedimentos e medidas destinadas a fazer a recolha de resíduos sólidos e sua reciclagem para a indústria para reutilização em seus próprios ou em outros ciclos produtivos viáveis ou, na impossibilidade dessa reciclagem, destinar os resíduos de forma ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A abordagem da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta importante para avaliar os impactos ambientais de diferentes opções de gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo.

Muitos estudos já consideraram vários aspectos do pós-consumo do PET, como diversos mecanismos de disposição (aterro, incineração, reciclagem química) e materiais alternativos (outros plásticos, vidro, metal). Um estudo realizado por Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) nas Ilhas Maurício tem mostrado que, considerando as dimensões ambientais e sociais de sustentabilidade, a reciclagem

mecânica de 75% de resíduos de PET para produzir flocos de PET, com o remanescente enviado ao aterro 25% foi a melhor estratégia dentre o envio de 100% dos resíduos para o aterro, ou 75% de incineração (25% de aterro) ou 40% de reciclagem (60% de aterro) (Foolmaun e Ramjeeawon, 2013a). Kuczenski e Geyer, que estudaram a logística reversa do PET na Califórnia, EUA, indicam que a reciclagem (em oposição ao aterro) pode reduzir os impactos ambientais de várias categorias, notadamente aquecimento global, acidificação e destruição da camada de ozônio. Vários estudos também apontaram que o maior benefício da reciclagem do PET são as compensações de impacto devido à substituição do PET de base fóssil (MICHAUD et al., 2010; PARK; GUPTA, 2015; KANG et al. 2017). Outro benefício da reciclagem do PET seria aumentar a vida útil operacional do aterro, reduzindo o volume de resíduos que vai para o aterro. As melhores práticas de descarte de PET dependerão da demanda de energia do país, do nível de reciclagem e da infraestrutura disponível para reciclagem. Assim, o contexto específico do país deve ser levado em consideração.

Há indícios de que a avaliação dos cenários de final de vida do PET é rara para os países em desenvolvimento (GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2019). Na verdade, há poucos dados disponíveis para a América do Sul. Além disso, a maioria dos estudos geralmente se concentra em apenas duas categorias de impacto, consumo de energia e potencial de aquecimento global (GOMES; VISCONTE; PACHECO, 2019). Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os impactos ambientais associados ao descarte e reciclagem de resíduos de garrafas PET no Brasil, usando uma abordagem de ACV. A cidade de Bauru, no estado de São Paulo, foi utilizada como área de estudo de caso.

Diferentes cenários foram considerados para avaliar os impactos de diferentes opções de gestão de resíduos, incluindo reciclagem mecânica, aterro e incineração. A coleta e transporte de resíduos de PET também foram incluídos na análise. Os resultados dessa avaliação podem orientar os formuladores de políticas na tomada de decisões sustentáveis com relação à gestão de resíduos no município de Bauru e em outras cidades com estratégias semelhantes de gestão de resíduos.

3.2 POLÍTICA DE GESTÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL

No Brasil, soluções para as questões relacionadas à fase pós-consumo do PET têm sido propostas pela (1) Resolução PET-PCR nº 20/2008 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2008) e (2) pela Política Nacional de Resíduos Sólidos

(BRASIL, 2010). A geração de resíduos no Brasil aumentou 29% de 2003 a 2014, o que é cinco vezes maior que o crescimento populacional (6%) do mesmo período, sendo que 41% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) brasileiros são depositados em aterro ou descartados (ABRELPE, 2014). Em se tratando de PET, o Brasil apresenta um dos maiores índices de consumo do mundo com 840 mil toneladas consumidas em 2016 (COELHO; CASTRO; JR, 2011), sendo 90% delas para garrafas PET (ABIPET, 2016b)

A taxa atual de reciclagem do PET é de 51% (ABIPET, 2016a), e a principal barreira à reciclagem é o sistema tradicional de coleta seletiva, nomeadamente porque uma cultura de separação de resíduos nos domicílios brasileiros não é praticada ou comum (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014). Outra barreira específica encontrada no Brasil, mas que pode se aplicar a muitos outros países também, é que as instalações de recuperação de materiais (chamadas de cooperativas de triagem), responsáveis pela separação dos resíduos recicláveis, muitas vezes não possuem equipamentos e tecnologias adequados, funcionando em más condições e com equipe mal treinada, reduzindo muito a capacidade de triagem (PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO, 2016).

O estabelecimento de padrões para a produção de PET reciclável pós-consumo (PET-PCR), implantado por meio da Resolução nº. 20/2008 é um passo importante para a redução da produção de PET de origem fóssil. Com isso, empresas que produzem materiais PET-PCR reciclados de grau alimentício podem se certificar e ter seus produtos comercializados. O PET reciclado pode então substituir o PET de origem fóssil, voltando a entrar no mercado de PET. Uma vez lá, ele pode ser usado para produzir o mesmo produto (malha fechada) ou um produto diferente (malha aberta).

Atualmente, 25% do PET reciclado no Brasil é utilizado diretamente na produção de garrafas PET (B2B), enquanto outro quarto é destinado à produção têxtil, cerca de 30% é utilizado para a produção de resinas alquílicas insaturadas e o restante é utilizado na produção de outros tipos de embalagens, como laminados e chapas (ABIPET, 2016a). Porém, espera-se que a produção de B2B aumente 60% nos próximos anos (ABIPET, 2016a), tornando esta aplicação a mais provável em um futuro próximo.

A PNRS foi criada para melhorar a situação da gestão de resíduos sólidos no Brasil, reduzindo a geração de resíduos e estabelecendo uma responsabilidade compartilhada – entre os produtores de resíduos, fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, residentes e operadores de serviços de gestão de resíduos

sólidos – no que diz respeito à logística de reserva de resíduos e embalagens pós-consumo (MMA, 2015).

A coleta seletiva é o elo mais frágil na reciclagem de resíduos de PET, pois depende da capacidade e disposição da população em separar os recicláveis dos orgânicos e dos municípios em coletar e redirecionar os resíduos recicláveis para triagem nas cooperativas (FORMIGONI; SANTOS; MEDEIROS, 2014) .

A responsabilidade compartilhada proposta pela PNRS pode ajudar a fortalecer as práticas atuais de coleta seletiva, estimulando a sociedade a participar e se engajar no processo de coleta. Isso é exemplificado pela criação de Ecopontos, locais da cidade onde pessoas e pequenos negócios podem fazer o descarte de recicláveis e outros tipos de resíduos, e pela coleta seletiva oferecida pelas próprias cooperativas. Embora essas ações ainda representem um pequeno percentual do total da coleta seletiva, são importantes como medidas de educação e podem se tornar mais comuns a partir da crescente conscientização da população e dos governantes.

3.3 FRAMEWORK PARA APLICAÇÃO DA ACV AMBIENTAL

A estrutura *framework* da ACV ambiental segue s normas da ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b). A Figura 14 apresenta a estrutura que segue as diretrizes da ISO 14040 para aplicação da avaliação do ciclo de vida em resíduos de garrafa PET.

Figura 14: *Framework* metodológico para realização da ACV - Ambiental



Sobre a Figura 14 observa-se segundo as diretrizes da ISO 14040 as fases de Objetivo e escopo. Inventário do Ciclo de Vida. Avaliação de impacto e Interpretação. Sobre essas fases descreve-se:

Objetivo e escopo

Essa fase deverá ser realizada após a execução de uma revisão estruturada da literatura para verificar os pontos de lacuna e trabalhos relevantes na área.

A unidade funcional deste *framework* é de 1 tonelada (t) de resíduos de garrafa PET pós-consumo, e o total de resíduos de garrafa PET coletados na cidade de aplicação da ACV anual deve ser usada para calcular os percentuais do fluxo de referência por 1 tonelada. Observa-se que o termo “resíduos de PET” refere-se apenas à garrafa PET, excluindo outros materiais subsidiários da garrafa. As fronteiras do *framework* desta ACV estão descritas no apêndice A2.

O objetivo deste *framework* de ACV ambiental é avaliar os impactos ambientais de diferentes opções de gestão para resíduos de garrafa PET pós-consumo, considerando as alternativas de descarte na localidade do estudo de área. Nessa etapa é de grande valia realizar a descrição do estudo de área elencando as características da localidade escolhida, bem como das alternativas de destinação final para clarificar o fluxo de trabalho. Nesta estrutura são utilizadas as alternativas de Incineração, Reciclagem e Aterro.

- Aterro: Descarte dos resíduos orgânicos da coleta convencional.
- Reciclagem: Destinação dos resíduos recicláveis de garrafa PET colhidos através da modalidade de coleta seletiva
- Incineração: Descarte dos resíduos orgânicos da coleta convencional.

Inventário do Ciclo de Vida

Nessa etapa deve-se levantar as entradas do sistema para que assim possa se estabelecer os fluxos dentro do escopo e objetivo de pesquisa escolhidos na fase I (Objetivo e escopo).

O apêndice A2 contém elementos para colaborar no levantamento dos dados de inventário, para a aplicação dentro do estudo da localidade deve se preencher os pontos destacados em verde em cada célula da planilha do Excel (Apêndice 2).

Avaliação do Ciclo de Vida

Para avaliação do ciclo de vida de resíduos da garrafa PET recomenda-se a utilização do software SimaPro 8 para calcular os impactos ambientais das emissões e processos descritos na fase de inventário, pois observou-se sua respectiva utilização com êxito em diversos trabalhos de alta relevância: Foolmaun e Ramjeawon (2013b), Ingraio et al. (2014), Kangas et al. (2017), Manfredi e Vignali (2015). Neste trabalho foi utilizado o software SimaPro 8 em parceria com a Universidade da South Florida.

Utilizando o método *Allocation Default* (alocação no ponto de substituição no Ecoinvent) dentro do *Software* SimaPro para estabelecimento do workflow. E o método *ReCiPe Worldwide Midpoint* (Hierárquico) v1.09 para avaliação das categorias elencadas: Alterações Climáticas (kg CO₂ eq), Destruição da camada de ozônio (kg CFC-11 eq), Acidificação terrestre (kg SO₂ eq), Eutrofização de água doce (kg P eq), Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq), Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DB eq) e Ecotoxicidade de água doce (kg 1,4-DB eq).

Interpretação

Nesta fase recomenda-se fazer uso de gráficos para poder comparar os resultados das possíveis alternativas, e assim poder comparar os cenários. O Apêndice A2 tem um modelo para inserção dos resultados da ACV ambiental onde os gráficos são gerados automaticamente para auxiliar a interpretação das alternativas.

3.4 APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK* DA ACV AMBIENTAL NA CIDADE DE BAURU .

Para realização do estudo de caso foi utilizado o *framework* da seção 4.3. Onde as atividades foram sistematizadas nas quatro etapas: Objetivo e escopo. Inventário do Ciclo de Vida. Avaliação do Ciclo de Vida e Interpretação.

3.4.1. Objetivo e escopo

A etapa de Objetivo e escopo contém a caracterização do estudo de área, referência normativa, Objetivo, Limites do sistema e descrição dos cenários.

Área de estudo e situação atual

A cidade de Bauru, no estado de São Paulo, Brasil é a área de estudo. Em 2019, 96.274 toneladas (t) de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) residenciais foram coletadas pelo município (ver Tabela 09). Com uma população estimada de 376.818 habitantes em 2019 a taxa de geração de RSU per capita é cerca de 0,7 kg / dia por pessoa (IBGE, 2020). Existem quatro maneiras pelas quais os RSU (ou alguns de seus componentes) podem ser coletados na cidade: (1) coleta convencional (coleta mista de resíduos) realizada pela empresa de desenvolvimento urbano e rural da cidade (EMDURB); (2) coleta seletiva de materiais recicláveis é realizada pela EMDURB; (3) coleta seletiva de materiais recicláveis é realizada pela associação de catadores de recicláveis da cidade (ASCAM); e (4) por meio de Ecopontos, locais específicos da cidade onde a população pode depositar alguns tipos de resíduos (inclusive recicláveis) e de onde os resíduos são transportados para um local apropriado para disposição final ou reutilização.

Durante o período de coleta dos dados para este estudo, o transporte dos Ecopontos foi gerenciado pela Secretaria de Meio Ambiente do município (SEMMA). As quantidades de RSU e porcentagem de resíduos de tereftalato de polietileno (PET) no RSU para esses quatro métodos de coleta são apresentados na Tabela 08. Os dados apresentados na Tabela 08 foram obtidos por meio de entrevistas com a EMDURB e SEMMA e presencial na ASCAM.

Tabela 8: Resíduos sólidos municipais (RSU) e resíduos PET coletados em 2019.

	EMDURB convencional	EMDURB seletiva*	ASCAM*	Ecopontos – SEMMA**	Total
RSU (t)	93.600	1.750	204	720	96.274
% PET em RSU	5,21	5,94	8,65	8,36	5,4
PET (t)	4.880	104	18	60	5.062
% of Total PET	96,4	2,1	0,3	1,2	100

* RSU coletado inclui apenas recicláveis (papéis, metais, vidro, plásticos). ** O RSU coletado inclui recicláveis, eletrônicos e alguns resíduos orgânicos (óleo usado).

Referência normativa

As métricas ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISSO 14044 (ABNT, 2014b) fornecem as diretrizes para a realização de uma avaliação do ciclo de vida. Ele divide o LCA em quatro partes: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Objetivo e escopo

A unidade funcional é de 1 tonelada (t) de resíduos de garrafa PET pós-consumo, e o total de resíduos de garrafa PET coletados na cidade de Bauru em 2019 foi usado para calcular os percentuais do fluxo de referência por 1 tonelada. O termo “resíduos de PET” refere-se apenas à garrafa PET, excluindo a tampa de plástico, o rótulo e quaisquer resíduos restantes na garrafa. O objetivo deste estudo de ACV foi avaliar os impactos ambientais de diferentes opções de gestão para resíduos de garrafa PET pós-consumo, considerando vários cenários, conforme descrito na seção 3.3.3.

Limites do sistema

O sistema não é “do berço ao túmulo”, pois se inicia no momento do descarte da garrafa PET pelos consumidores e termina quando o valor e a utilidade são recuperados ou descartados. O limite do sistema inclui a coleta e transporte de resíduos da garrafa PET, sua reciclagem ou descarte e substituição de granulado de PET de base fóssil (pela esterificação de etileno glicol e processo de ácido tereftálico), quando aplicável. Os insumos do sistema são: fluxos de materiais, como resíduos de PET, óleo diesel para caminhões de coleta e transporte e equipamentos de processo, e materiais para construção de instalações e instalações de gerenciamento de resíduos; e fluxos de energia, como eletricidade e calor para operações de processo. As saídas do sistema são: emissões de caminhões de coleta e transporte e outras máquinas, emissões diretas de processos de gerenciamento de resíduos, emissões indiretas de construção de instalações e produção de eletricidade / calor e emissões evitadas da produção de PET com base em fósseis.

A estrutura de gestão de resíduos em Bauru é atualmente composta pelas seguintes instalações: 1 estação de tratamento de águas residuais (ETAR) ($1,26 \times 10^9$ L/ano de capacidade), 8 Ecopontos, 1 aterro público (fechado em 2014, mas ainda coletando lixiviado), e 3 cooperativas de triagem. Com o fechamento do aterro sanitário da cidade, o RSU gerado em Bauru é encaminhado para um aterro privado em uma cidade vizinha (Piratiníngua/SP, Brasil), localizada a 43 km de Bauru. O gás de aterro sanitário (LFG) é capturado e queimado e, embora um projeto de energia de LFG esteja sendo considerado (Nascimento et al., 2019), nenhuma recuperação de energia foi assumida. O chorume produzido neste aterro é armazenado e transportado por

caminhões até Jundiaí/SP, Brasil (350 km do aterro), onde é tratado em uma estação de tratamento de efluentes, e o lodo digerido resultante é compostado na mesma instalação.

Tabela 9: Distâncias de Transportes estimadas para a coleta do resíduo da garrafa PET em Bauru.

Descrição de transporte	Distância [km]	Fonte
Coleta convencional EMDURB + transporte para aterro	130	EMDURB*
Coleta seletiva da EMDURB + transporte para cooperativas	90	EMDURB*
Coleta ASCAM + transporte para cooperativas	90	ASCAM**
Ecoponto + transporte SEMMA dos Ecopontos para as cooperativas	44	SEMMA*
Transporte de rejeitos de reciclagem de PET das cooperativas para aterro	42	Estimado
Transporte de fardos PET das cooperativas para a indústria de	255	Estimado
Transporte de chorume do aterro sanitário para a ETAR de Jundiaí	350	Estimado
Transporte de escórias / resíduos da planta de incineração para o aterro	100	Distância presumida para a planta de incineração proposta
Transporte de lamas da ETAR para aterro sanitário em S. Carlos / Caieiras	11	Estimado

Obs.:* Dados coletados em campo por meio de entrevista presencial. ** Dados coletados in loco. No *framework* elaborado estas distâncias podem ser alteradas.

A reciclagem do PET começa nas cooperativas de triagem, onde os resíduos do PET são separados, prensados e enfardados. Os fardos são comprados por empresas de reciclagem. No caso do PET, o processo de reciclagem para produzir PET para embalagem de alimentos consiste na limpeza, trituração (para produzir flocos), extrusão e corte para produzir grânulos (ou resinas termoplásticas). A eficiência desse processo foi considerada como 91% (KÄGI et al., 2017). Existem apenas 2 empresas no Estado de São Paulo certificadas para produzir grânulos de PET de grau alimentício (resinas) a partir de PET reciclado; muitos outros são certificados para produzir uma variedade de outros materiais PET de qualidade alimentar, a partir de flocos reciclados ou resinas recicladas (ANVISA, 2020), mas ficam muito distantes em relação à área de estudo. Mas, como neste estudo a produção de PET granulado foi assumida como o processo de substituição, a distância de transporte das cooperativas de triagem até as instalações de reciclagem de PET foi considerada como uma distância média para essas duas

empresas, uma em São Carlos, SP (175 km de Bauru) e outra em Caieiras, SP (335 km de Bauru). A Tabela 9 resume as distâncias de transporte, incluindo a coleta de lixo.

Atualmente, 96,4% dos resíduos de PET coletados em Bauru são encaminhados diretamente para o aterro sanitário, enquanto 3,6% são transportados para as cooperativas de triagem. A eficiência de triagem do PET nas cooperativas é de 80,4%, sendo que o PET rejeitado é descartado em aterro (dados coletados na ASCAM). Com eficiência de reciclagem de 91%, apenas 2,6% dos resíduos de PET em Bauru são efetivamente reciclados e 97,4% são encaminhados para aterro. Esse número está bem abaixo da média nacional brasileira de coleta de PET para reciclagem, que é de 51% (ABIPET, 2016a). Os resíduos coletados nos Ecopontos possuem algum nível de triagem, porém devido ao transporte precário para as cooperativas de triagem, os recicláveis são novamente misturados e, portanto, foi assumido que os resíduos de PET coletados nos Ecopontos tiveram a mesma eficiência de triagem que o das cooperativas de triagem. As descrições dos limites do sistema para o cenário base são fornecidas na Figura 15. Na próxima seção, uma descrição detalhada para os outros 8 cenários considerados será apresentada.

Descrição dos cenários

Com base na revisão da literatura sobre a ACV explicitada no capítulo 1 foram escolhidos cenários puros (100% com destinação final para um único destino. As opções utilizadas de cenários puros foram aterro, cooperativas de triagem e incineração. Essa tomada de decisão foi realizada para possibilitar a comparação entre os resultados desta pesquisa com outros trabalhos externos a esse. Também foram incluídos neste trabalho composições entre esses cenários puros.

Assim, nove cenários foram considerados neste estudo: (1) cenário atual (base) (96,4% do fluxo de referência é enviado para aterro, 3,6% é enviado para cooperativas de triagem, conforme apresentado na seção 3.2.; (2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro; (3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração; (4) 50% para aterro, 50% para incineração; (5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleta atual); (6) 100% para aterro; (7) 100% para incineração, (8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva), (9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados nos Ecopontos,

25% coletados por coleta seletiva. O cenário base (cenário 1) foi descrito na seção 3.2 e está esquematicamente representado na Figura 15.

O segundo cenário (Figura 16) propõe um aumento para 50% dos resíduos de PET coletados encaminhados para as cooperativas de triagem (ao invés de 3,6%), sendo o restante dos resíduos de PET coletados descartados diretamente no aterro. Foram considerados os bens de capital para a expansão das cooperativas de triagem, uma vez que já operam a plena capacidade (PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO, 2016), e o aumento da capacidade de triagem exigiria mais infraestrutura do que a atualmente disponível. O tratamento dos efluentes gerados durante a reciclagem dos resíduos de PET, nas empresas recicladoras, ocorre nas estações de tratamento de efluentes das cidades onde ocorre a reciclagem, e o lodo resultante é enviado para aterro. A construção de um aterro sanitário também foi incluída, uma vez que os aterros são locais de disposição de resíduos que são continuamente construídos à medida que mais resíduos são depositados e também para estabelecer comparações justas com outros cenários onde é necessária nova infraestrutura. Também foi considerada a construção da ETAR para tratamento de lixiviados e instalação de compostagem (para tratamento de lamas). O PET rejeitado pelas cooperativas de triagem e recicladores (27% dos resíduos de PET encaminhados às cooperativas de triagem) é depositado em aterro.

O cenário 3 (Figura 17) consiste no envio de 50% dos resíduos de PET para cooperativas de triagem, enquanto os 50% restantes são encaminhados diretamente para uma unidade de incineração. Não há usina de incineração em Bauru, e embora sua construção tenha sido desaconselhada (PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO, 2014), devido aos altos investimentos iniciais, necessidade de grande infraestrutura para controle de emissões, mão de obra reduzida quando comparada a outras opções de gestão de resíduos e diminuição taxas de reciclagem, foi considerada neste estudo devido às compensações de energia proporcionadas pela combustão de resíduos de PET, que podem trazer benefícios ambientais. A energia gerada durante a incineração do PET foi estimada usando o menor valor de aquecimento do PET (22,95 MJ / kg) e eficiências de geração de eletricidade e calor durante a incineração de 15,8% e 28,5%, respectivamente (Doka, 2013). Como o aquecimento urbano não é uma prática comum no Brasil, o excesso de calor produzido durante a incineração, que ainda não é reutilizado na instalação de incineração, foi considerado convertido em eletricidade em uma turbina a vapor com eficiência de 45%, resultando em um resultado geral eficiência

de geração de eletricidade de 28,6%. As escórias e resíduos produzidos durante a incineração foram considerados para serem depositados em aterro, sem produção de lixiviado. A instalação de incineração foi presumida como localizada a 100 km do aterro. Este é o único cenário em que o PET rejeitado das cooperativas de triagem é incinerado, e não depositado em aterro. As distâncias de coleta até a incineração foram consideradas iguais às distâncias de coleta até o aterro.

O cenário 4 (Figura 18) propõe uma redução na quantidade de resíduos de PET depositados em aterro para 50%, com o PET restante sendo incinerado. Foram consideradas as construções de aterros e instalações de incineração, bem como a construção de outras instalações a jusante (ETAR, compostagem).

O cenário 5 (Figura 19) assume que todos os resíduos de PET são enviados para as cooperativas de triagem e mantém o esquema de distribuição de coleta de PET apresentado na Figura 19. Esse cenário exigiria a separação dos recicláveis pela população antes da coleta, para que todo o PET pudesse ser coletado por meio de coleta seletiva. O PET coletado pela coleta convencional da EMDURB foi considerado coletado pela coleta seletiva da EMDURB. O PET rejeitado para reciclagem (tanto nas cooperativas de triagem de Bauru quanto nas recicladoras de São Carlos/Caieiras) é destinado ao aterro sanitário. Este é um cenário otimista que considera o que aconteceria se todos os habitantes reciclassem seus resíduos de PET.

O cenário 6 (Figura 20) assume que todos os resíduos de PET são depositados em aterro, enquanto o cenário 7 (Figura 21) representa a incineração de 100% dos resíduos de PET.

Os cenários 8 (Figura 22) e 9 (Figura 23) são semelhantes ao cenário 5, com todos os resíduos de PET sendo enviados para cooperativas de triagem, mas diferem na estrutura de coleta. No cenário 8, 50% dos resíduos de PET são coletados em Ecopontos, sendo o restante coletado por coleta seletiva (85% realizada pela EMDURB, 15% pela ASCAM). No cenário 9, a porcentagem de PET coletada de Ecopontos aumenta para 75%, com os 25% restantes sendo coletados seletivamente pela EMDURB (85%) e ASCAM (15%). Para ambos os cenários, o PET rejeitado é depositado em aterro.

É importante ressaltar que o transporte de resíduos de PET realizado pela população até os Ecopontos não é considerado, uma vez que não é possível contabilizar a distância percorrida por todos os usuários do Ecoponto, ou determinar se a viagem foi feita exclusivamente para o Ecoponto, e não para outros fins, incluindo o Ecoponto.

Figura 15: Limite do sistema para o cenário base (S1).

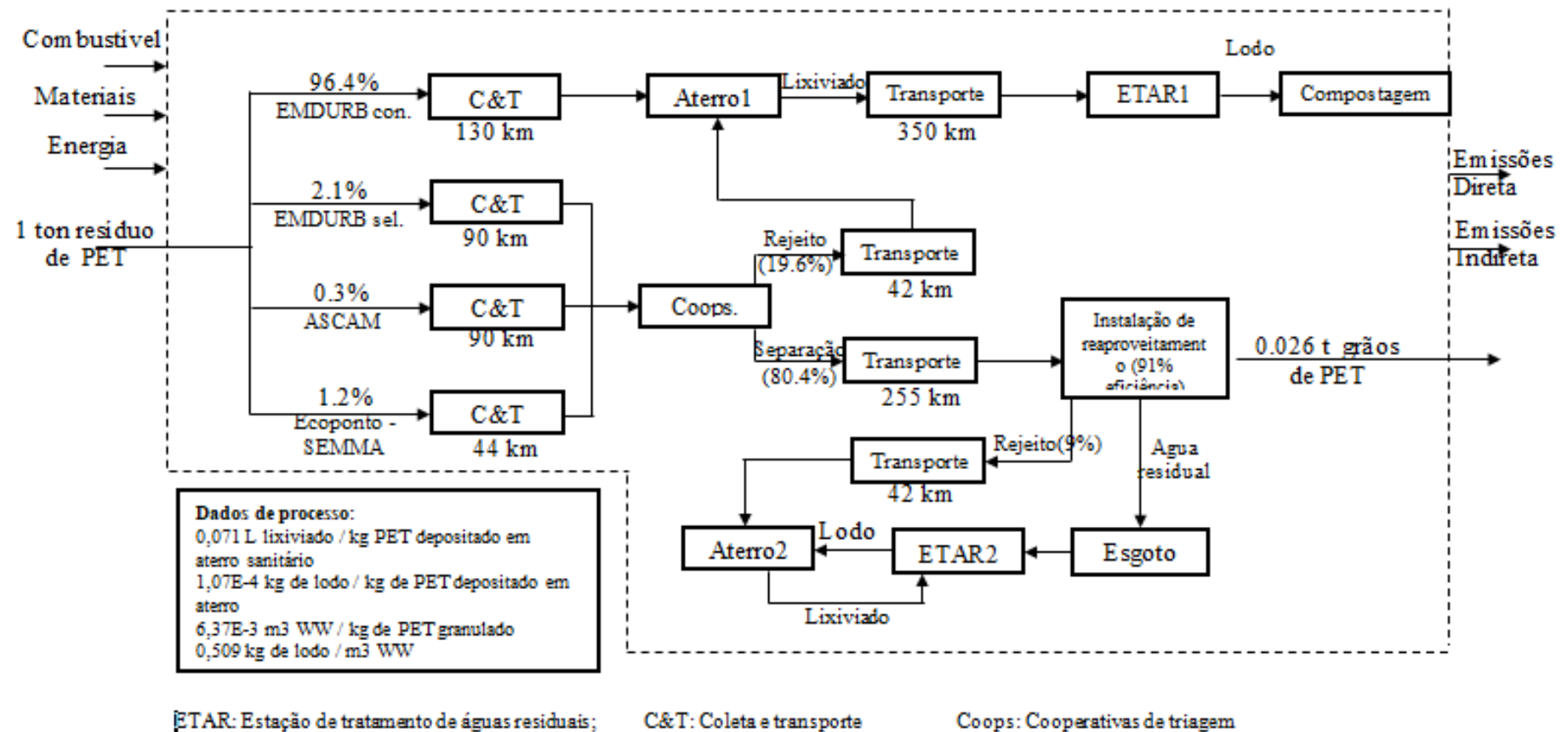


Figura 16: Limite do sistema para o cenário 2 (50% aterrado, 50% enviado para cooperativas de triagem, rejeito é aterrado).

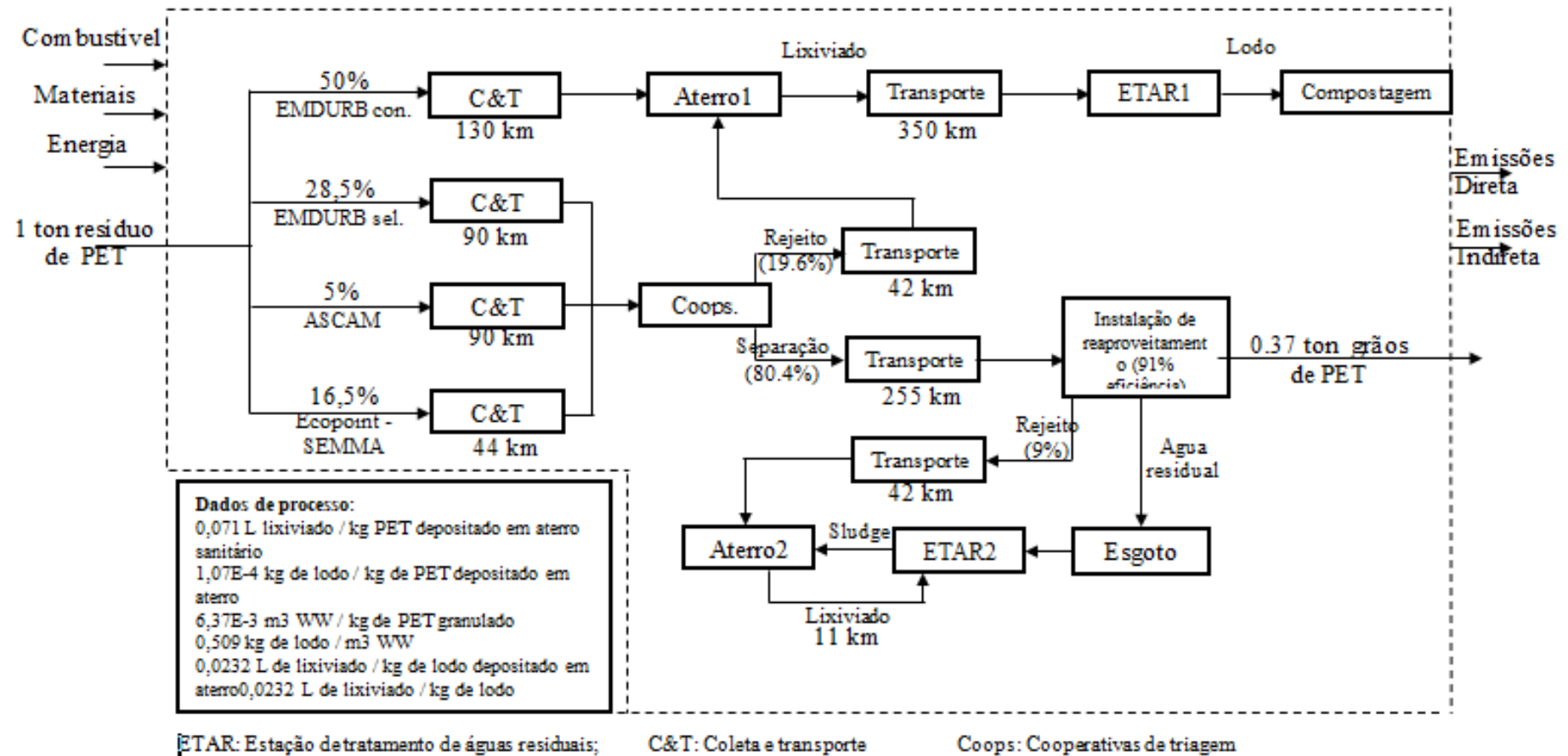


Figura 17: Limite do sistema para o cenário 3 (50% incinerados, 50% enviados para cooperativas de triagem, rejeitos de cooperativas de Bauru são incinerados, rejeitos de instalações de reciclagem em S. Carlos / Caieiras são depositados em aterro).

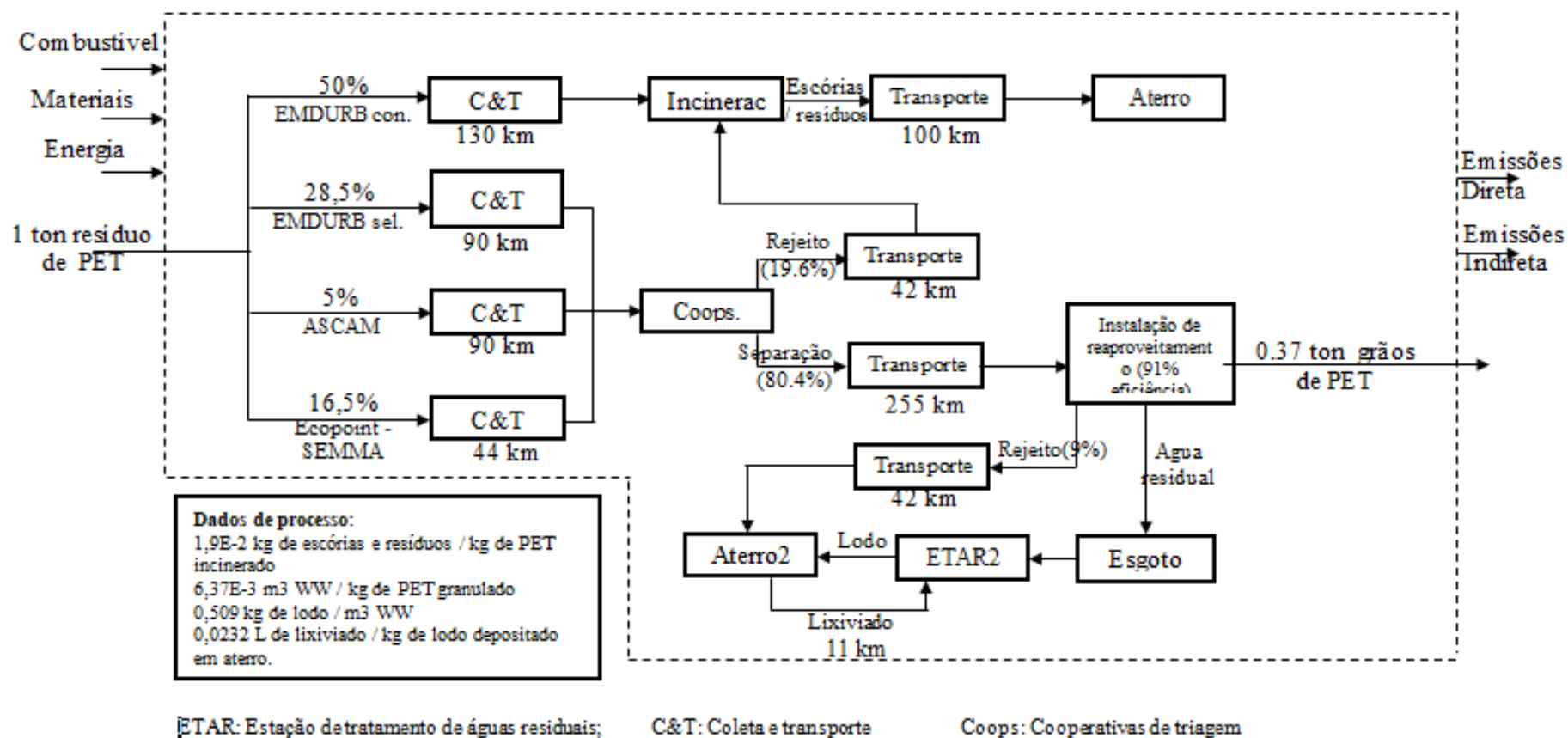


Figura 18: Limite do sistema para o cenário 4 (50% aterrado, 50% incinerado).

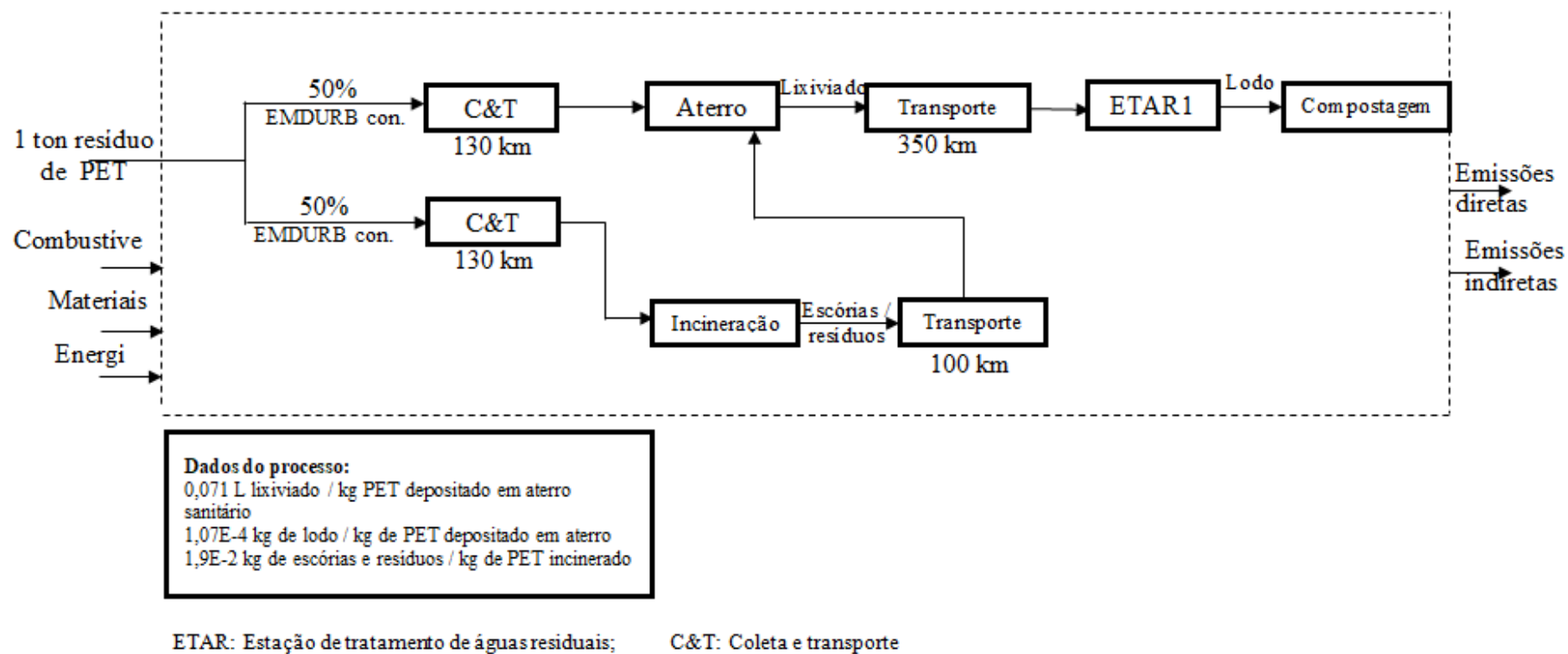


Figura 19: Limite do sistema para o cenário 5 (100% enviado para cooperativas de triagem, o rejeito é depositado em aterro)

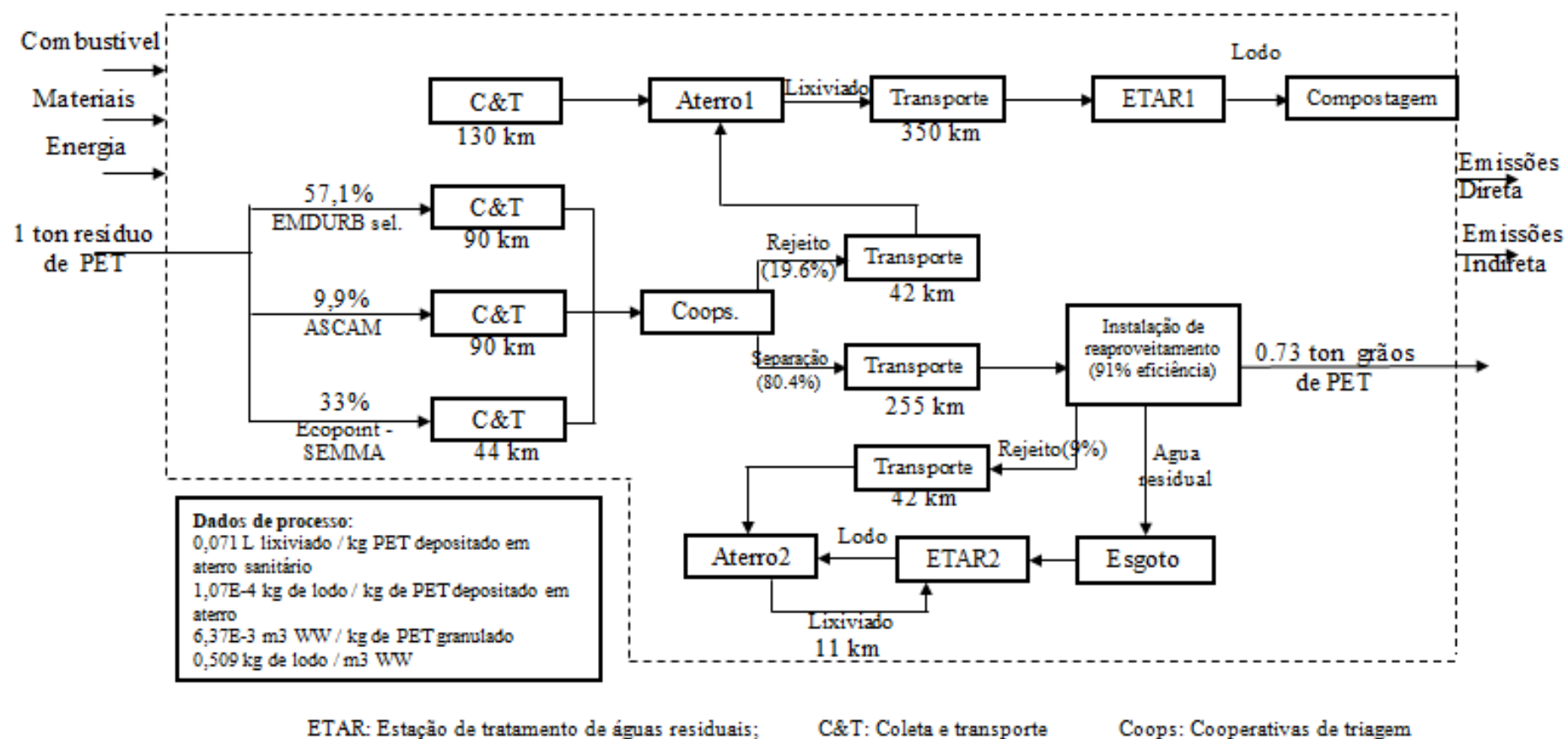


Figura 20: Limite do sistema para o cenário 6 (100% aterrado).

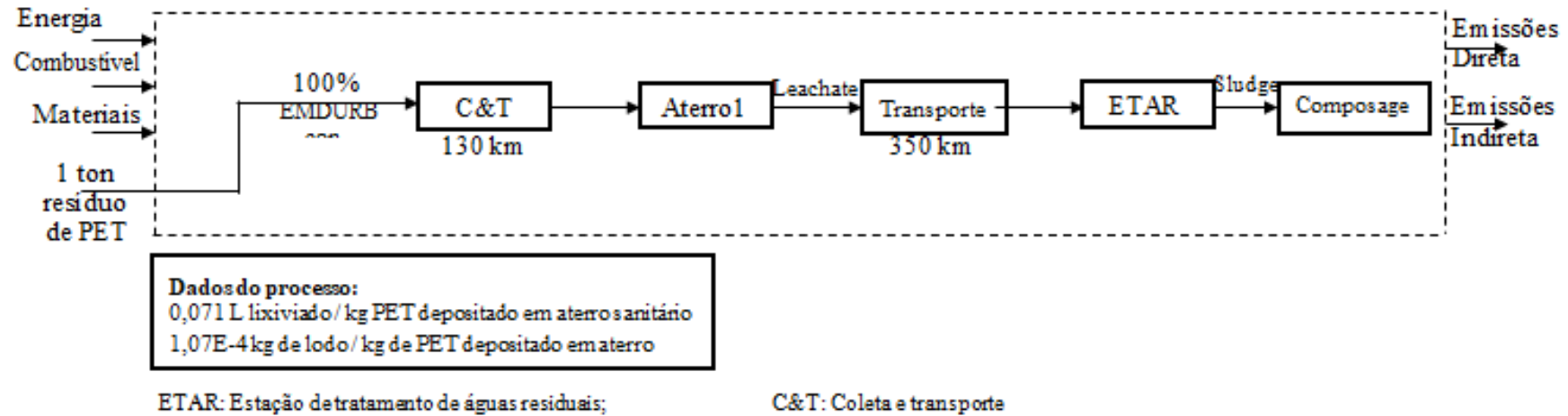


Figura 21: Limite do sistema para o cenário 7 (100% incinerado).

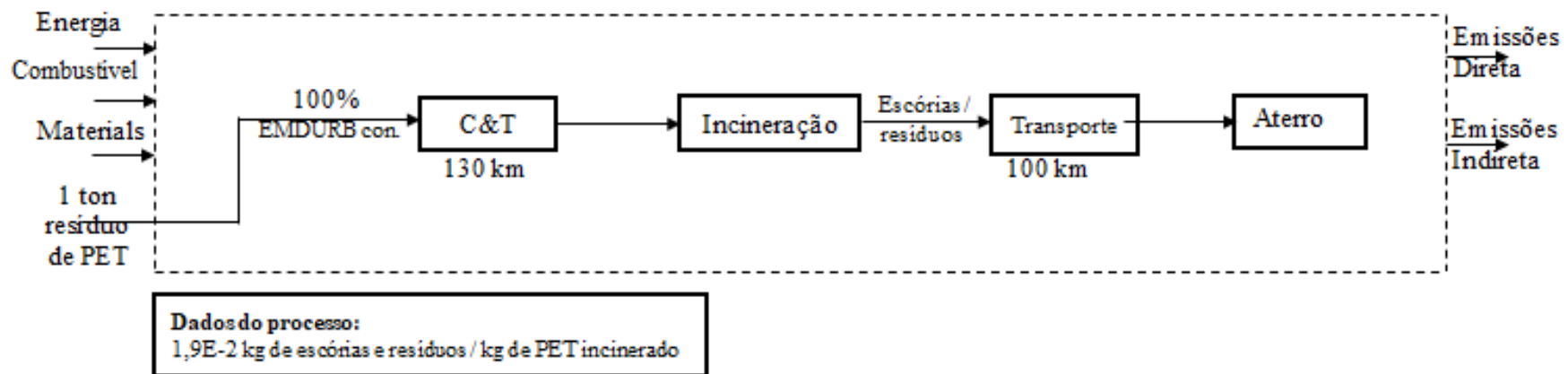
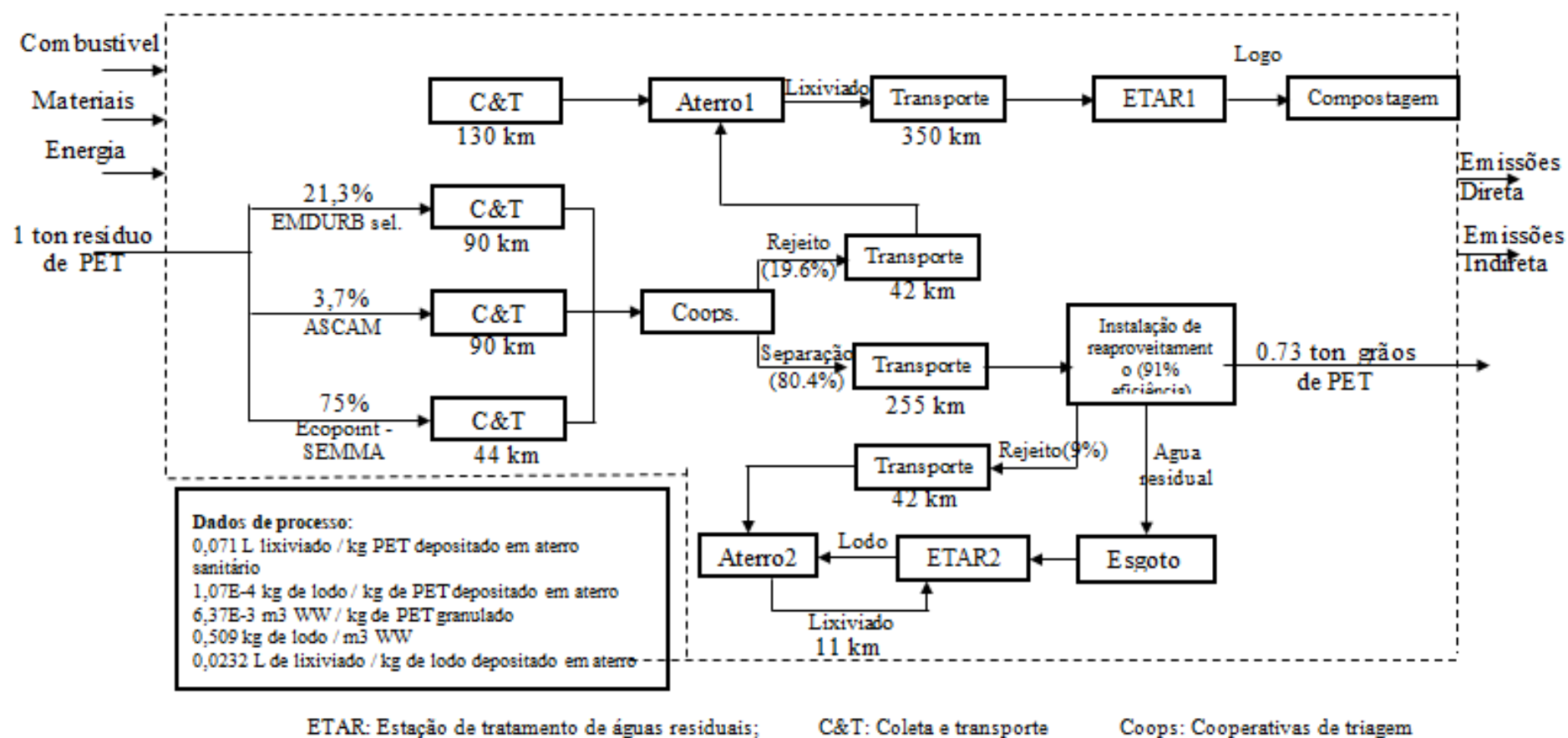


Figura 23: Limite do sistema para o cenário 9 (100% enviado para cooperativas de triagem, 75% coletado em Ecopontos, rejeito é depositado em



3.4.2. Inventário

Os dados primários foram coletados para as necessidades de energia e insumos de materiais de uma cooperativa de triagem (instalação), mostrados na Tabela 10, quantidade de resíduos de PET coletados (Tabela 09) e distâncias de transporte (Tabela 10).

Tabela 10: Consumo de energia e entrada de materiais para reciclagem em Bauru (por ton. resíduo PET).

Entrada	Quantidade	Unidade
Trefilado de aço, para fardos	1.65	kg
Empilhadeira combustível GLP **	7	L
Elettricidade *, correia	4.47	kWh
Elettricidade *, pressione	11.9	kWh
Elettricidade *, enfardamento	0.13	kWh
Elettricidade *, correia	1.52	kWh

* A eletricidade é de média tensão. ** GLP significa Gás Liquefeito de Petróleo.

Para coleta e transporte, a frota da cidade foi analisada para obter a capacidade média de caminhões (em torno de 16 a 18 t), e modelo de ano, que indicaria o padrão de emissões a utilizar (EURO 1, 2, 3, 4, 5 ou 6), conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11: Frota de coleta e transporte em Bauru.

	EMDURB	EMDURB	SEMMA /
Nº total de caminhões	21	6	7
Capacidade média (t)	18	16,8	18
% EURO 1 (1992) *	-	16,7	-
% EURO 2 (1995- 1996)	-	-	-
% EURO 3 (1999- 2000)	19,0	16,7	-
% EURO 4 (2005)	47,6	16,6	-
% EURO 5 (2008)	14,3	50,0	71,4
% EURO 6 (2012)	19,0	-	28,6

* O (s) ano (s) entre parênteses indicam o ano do modelo para caminhões aos quais se aplicam os padrões de emissões. ¹ Dados do Plano Municipal Saneamento Básico (2016). ² Dados da Prefeitura de Bauru 2010 e 2020.

O transporte do rejeito PET das cooperativas para o aterro e das escórias / resíduos da incineração para o aterro foi considerado realizado pela frota de coleta convencional da EMDURB. O transporte dos fardos das cooperativas até a recicladora

foi assumido em um caminhão EURO 6, com capacidade de 16-32 t, e o transporte do chorume do aterro à ETAR (Estação de tratamento de águas residuais) de Jundiaí, por um caminhão EURO 5, com capacidade de 23 t. O inventário de emissões para caminhões EURO foi de Keller (2010).

O inventário de construção para uma instalação de reciclagem de materiais (KÄGI et al., 2017), instalação de aterro sanitário, instalação de incineração municipal, estação de tratamento de águas residuais, rede de esgoto (DOKA, 2007) e estação de compostagem (NEMECEK et al., 2007) foram obtidos dos inventários Ecoinvent v3.6 (2019) para uma geografia global, uma vez que não havia estoques específicos para o Brasil. Foram utilizados processos correspondentes ao mercado global de produção de materiais de construção, uma vez que já contabilizam distâncias de transporte e consideram a tecnologia de produção média empregada mundialmente, a menos que um processo de produção específico, amplamente utilizado no Brasil, estivesse disponível.

A operação e o inventário de emissões para um aterro sanitário (DOKA, 2007), instalação de incineração municipal (DOKA, 2013; JUNGBLUTH et al., 2007), estação de tratamento de águas residuais (DOKA, 2008), produção de PET fóssil (PLASTICS EUROPE, 2017), e a produção de PET reciclado (KÄGI et al., 2017) foram adaptados dos inventários Ecoinvent v3.6 (2019) para uma geografia global. Para a fase de operação, sempre que possível, foram feitos ajustes nos processos e nas entradas de energia ou materiais para refletir mais especificamente a tecnologia ou as condições no Brasil. Por exemplo, a eletricidade foi produzida em usinas hidrelétricas, com dados específicos para a região sudeste do Brasil, onde está localizado o estado de São Paulo (BOLLIGER e BAUER, 2007) e o calor utilizado para a produção de PET a partir de resíduos de PET veio da queima de cavacos de madeira. Todos os dados relacionados à energia eram dados de energia média para o Brasil, e a recuperação de energia foi considerada apenas para cenários de incineração.

O inventário de operação de uma usina de compostagem foi adaptado de CADENA et al. (2009), utilizando processos de geração de energia elétrica que melhor representam a realidade brasileira. O inventário de emissões para uma usina de compostagem foi obtido de Amlinger; Peyr; Cuhls Carsten, (2008).

O Quadro 2 resume o inventário usado para este estudo, bem como os ajustes realizados.

Quadro 2: Lista de inventário : descrição dos processos na ficha 2 “Processos Simapro”.

Item	Comentários	Referência
Construção de instalação de preparação de resíduos, global	• Usado para a construção de uma instalação de reciclagem de materiais. • Capacidade: 5E8 ton em 50 anos. • Nenhuma modificação foi feita no inventário original.	Kägi et al. (2017)
Construção de instalação de incineração de lixo municipal, global	• Usado para a construção de uma instalação de incineração municipal. • Capacidade 100.000 ton / ano; 40 anos. • Nenhuma modificação foi feita no inventário original.	Doka (2007)
Construção de instalação de aterro sanitário, global	• Utilizado para construção de aterro sanitário. • Capacidade: 1,8E+6 ton em 30 anos (cuidados posteriores de 150 anos). • Nenhuma modificação feita no inventário original.	Doka (2007)
Construção de estação de tratamento de águas residuais, global	• Usado para a construção de uma estação de tratamento de águas residuais. • Capacidade: 5E+9 L / ano; 30 anos • Nenhuma modificação foi feita no inventário original.	Doka (2007)
Construção da rede de esgoto, global	• Utilizado para a construção de uma rede de esgoto. • Capacidade: 5E+9 L / ano; 110 km. • Nenhuma modificação foi feita no inventário original.	Doka (2007)
Produção de tereftalato de polietileno, granulado, grau de garrafa, global	• Usado para a produção comercial de PET a partir de etilenoglicol e TPA. • As fontes de água foram alteradas para a geografia BR (Brasil). • A geração de eletricidade foi alterada para hidrelétrica, geografia BR. • A geração de calor foi alterada para co-geração, diesel, BR.	PlasticsEurope (2017)

Quadro2: Lista de inventário (continuação).

Item	Comentários	Referência
Produção de tereftalato de polietileno, granulado, grau de garrafa, reciclado, global	• Usado para a produção de PET reciclado (grau alimentício) a partir de resíduos de PET. • As mesmas alterações foram feitas no item acima. • Presumido que todos os impactos do processo são devidos à produção de PET reciclado (processo original alocado 99,5% para PET e 0,5% para PE).	Kägi et al. (2017)
Separação de resíduos PET	• Usado para a separação mecânica de resíduos de PET antes da reciclagem. • Consulte a Tabela 2 em Martin et al. (2020) .	Dados primários ; Martin et al. (2020).
Tratamento de águas residuais, média, global	• Usado para o tratamento de águas residuais geradas em instalações de reciclagem de PET e lixiviado de aterro. • Emissões / encargos negligenciados devido ao espalhamento de lodo (que foram apresentados separadamente no inventário original). • Encargos negligenciados de incineração de parte do lodo (que foram apresentados separadamente no inventário original). • O inventário original incluiu as emissões devido à incineração de parte do lodo (que não foram apresentadas separadamente das emissões da ETAR, portanto foram subtraídas em outro inventário). • Nos cenários considerados, o lodo resultante da ETAR é compostado (lixiviado de aterro em Bauru) ou depositado em aterro (esgoto / lixiviado em S. Carlos / Caieiras). • As gerações de calor e eletricidade foram adaptadas para BR.	Doka (2008)

Quadro2: Lista de inventário (continuação).

Item	Comentários	Referência
Tratamento de resíduos de tereftalato de polietileno, incineração municipal, global	• Usado para as emissões / encargos operacionais da incineração de resíduos PET. • O processo original fornecia energia “líquida” da incineração. • A geração bruta de energia foi calculada separadamente (usando PET LHV e as eficiências de energia fornecidas no inventário). • A energia evitada foi calculada separadamente subtraindo a energia “líquida” da energia “bruta”. • A geração de eletricidade para a instalação usada foi assumida como proveniente da combustão PET • Presume-se que o calor para a instalação usada venha da combustão PET. • O excesso de calor não utilizado em outras partes da planta de incineração foi considerado convertido em eletricidade em uma turbina a vapor com eficiência de 45%. • O excesso de eletricidade total foi assumido para substituir a eletricidade (hidrelétrica, BR.)	Doka (2013)
Tratamento de resíduos de tereftalato de polietileno, aterro sanitário, global	• Usado para as emissões / encargos operacionais devido à deposição em aterro de resíduos de PET. • O inventário original considerou que o lodo resultante do ETAR de lixiviado de aterro foi incinerado. • Encargos operacionais negligenciados devido à incineração de lamas. Encargos operacionais devido ao aterro de lodo foram adicionados separadamente em outro processo. • As emissões devido à incineração de lodo não foram fornecidas separadamente das emissões do aterro / ETAR, portanto, foram subtraídas por outro processo. • A geração de eletricidade para uso no processo foi alterada para hidroeletricidade, BR.	Doka (2007)

Quadro2: Lista de inventário (continuação).

Item	Comentários	Referência
Encargos específicos do processo, aterro sanitário, global	• Usado para as cargas operacionais de aterro de lodo (produzido na ETAR de lixiviado de aterro). • Foi adicionado ao processo “Tratamento de Resíduos de Polietileno Tereftalato, Aterro Sanitário, Global”. • Eletricidade foi alterada para hidrelétrica, BR. • O calor para a operação do aterro sanitário veio do LFG; o excesso de calor não é recuperado.	Doka (2007)
Tratamento de lodo do digestor, incineração municipal, futuro, global	• Usado para as emissões resultantes da incineração de lodo do digestor (fermentado) resultante do tratamento de ETAR. • Foi subtraído dos processos “Tratamento de esgoto médio, global” e “Tratamento de resíduos PET, aterro sanitário, global”. • A geração de eletricidade para instalação utilizada foi adaptada para BR. • Presume-se que o calor para a instalação usada venha da combustão PET.	Jungbluth et al . (2007)
Tratamento de resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, global	• Utilizado para as emissões resultantes da deposição de lodo em aterro (produzido na ETAR de lixiviado de aterro). • A deposição de lodo em aterro foi aproximada como aterro de RSU médio, uma vez que não havia processos específicos para aterro de lodo. • Aterro de lodo é uma prática comum nos aterros fechados de Bauru e São Carlos. • Foi adicionado ao processo “Tratamento de resíduos PET, aterro sanitário, global”	Doka (2007)
Construção de instalação de compostagem, aberta, global	• Usado para a construção de uma instalação de compostagem aberta. • Capacidade: 10.000 ton / ano; 25 anos • Nenhuma modificação foi feita no inventário original.	Nemecek et al. (2007)
Compostagem de lodo de esgoto, operação	• Usado para os encargos operacionais para a compostagem em leira (aberta) de lodo de esgoto. • Eletricidade foi alterada para hidrelétrica, BR.	Cadena et al. (2009)

Quadro2: Lista de inventário (continuação).

Item	Comentários	Referência
Compostagem de lodo de esgoto, emissões	• Usado para as emissões diretas devido à compostagem em leira (aberta) de lodo de esgoto. • As emissões indiretas foram excluídas, uma vez que foram adicionadas a partir do inventário do item anterior.	Amlinger et al. (2008)
Transporte, carga, caminhão, 16-32 t. global	• Usado para as emissões e encargos operacionais (como construção e manutenção de estradas, construção e manutenção de caminhões, emissões indiretas devido a pneus, freios e desgaste da estrada) de frete de transporte em caminhões de 16-32 ton. • O uso de produtos químicos para matar ervas daninhas (glifosato) e agentes de descongelamento foram negligenciados.	Keller (2010)

3.4.3 Avaliação de impacto

Uma ACV atribucional, com energias médias, foi utilizada neste estudo. O software SimaPro 8 ® foi usado para calcular os impactos ambientais das emissões e processos descritos no inventário (ver seção 3.5.). O método selecionado no SimaPro foi o Padrão de Alocação (alocação no ponto de substituição no Ecoinvent). O método ReCiPe Worldwide Midpoint (Hierarchical) v1.09 foi usado para esta avaliação do ciclo de vida (GOEDKOOPE et al, 2008). Embora o método ReCiPe tenha 18 categorias de impacto, neste artigo foram avaliadas as seguintes categorias de impacto: mudança climática (kg CO₂ eq.), Destruição da camada de ozônio (kg CFC-11 eq.), Acidificação terrestre (kg SO₂ eq.) , Eutrofização da água doce (kg P eq.), Toxicidade humana (kg 1,4-DB eq.), Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DB eq.) E ecotoxicidade da água doce (kg 1,4-DB eq.). O resultado para as outras categorias de impacto pode ser visto no artigo Dados resumidos associado a este artigo (Martin et al., 2020). As categorias de impacto foram avaliadas para 100 anos de emissões decorrentes do tratamento de 1 tonelada de resíduos de PET, com base em dados de coleta e triagem durante um ano (2019). O período de tempo para a tecnologia utilizada nos inventários variou de 1994 a 2018. No entanto, como este trabalho não realizou um ACL consequencial e não foi o escopo deste projeto quantificar incertezas nos dados de LCI, a lacuna de tecnologia não foi considerada .

3.4.4 Avaliação de impacto

A fase de interpretação contém os resultados e discussões e conclusões sobre o estudo de caso realizado.

3.4.4.1 Resultados

Os valores de impacto para as categorias de mudança climática e destruição da camada de ozônio são mostrados para cenários S1 a S7 na Figura 24. Para acidificação terrestre e eutrofização de água doce, os impactos são mostrados na Figura 25. Para toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre e de água doce, os impactos são mostrados em Figura 26. A contribuição para o impacto total foi dividida em coleta e transporte (C&T), produtos evitados, construção, emissões e operação.

O valor líquido do impacto representa a soma das contribuições positivas e negativas. C&T refere-se a impactos (emissões diretas durante o transporte, emissões indiretas devido à construção de estradas e caminhos) devido à coleta e transporte de resíduos de PET, resíduos de PET rejeitados, resíduos gerados durante o descarte / reciclagem de resíduos de PET (lixiviado, escórias) e PET reciclado fardos, de cooperativas de triagem a instalações de reciclagem.

Os produtos evitados referem-se à eletricidade gerada durante a incineração de resíduos de PET e do PET reciclado, conforme apropriado para cada cenário. Construção refere-se aos impactos da construção das instalações, como o uso de combustível para maquinários de construção e emissões diretas, e impactos da fabricação e transporte de materiais de construção.

As emissões incluem as emissões diretas das opções de tratamento (ou reciclagem) de resíduos. A operação inclui os impactos devido ao uso de energia e materiais em cada cenário. Os impactos para os cenários S8 e S9 não são mostrados nas figuras, pois diferem apenas de S5 para C&T, e a diferença no impacto líquido não foi significativa.

A Tabela 12 mostra os valores dos impactos (incluindo a repartição das contribuições) em todas as categorias para todos os cenários.

Figura 24: Impacto total para as categorias de mudança climática e destruição da camada de ozônio e discriminação das contribuições.

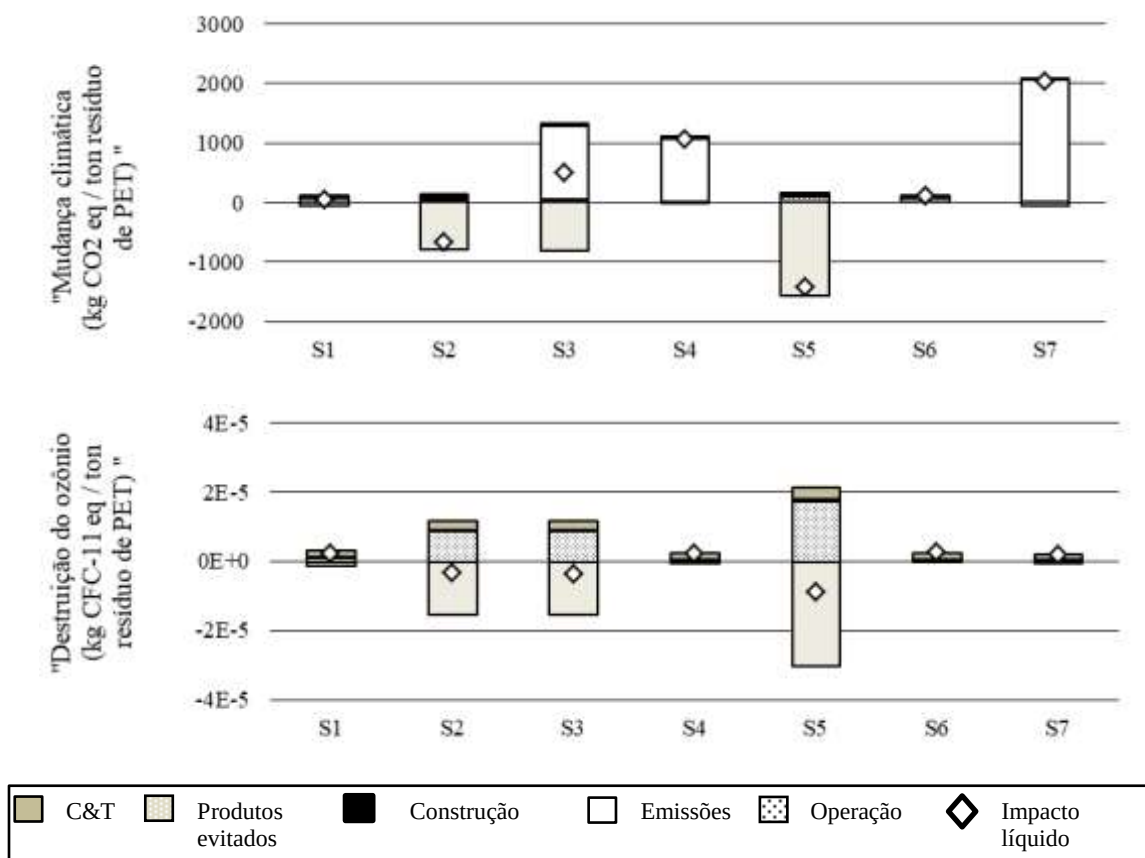


Figura 25: Impacto total das categorias de acidificação terrestre e eutrofização de água doce e repartição das contribuições.

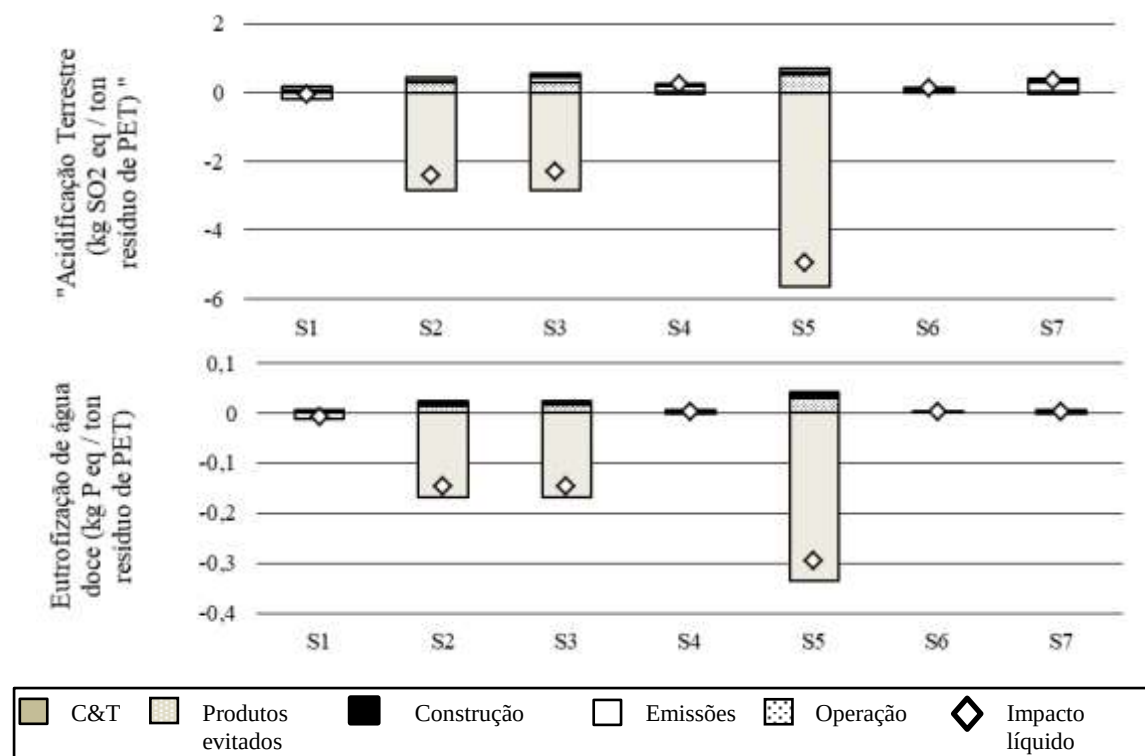
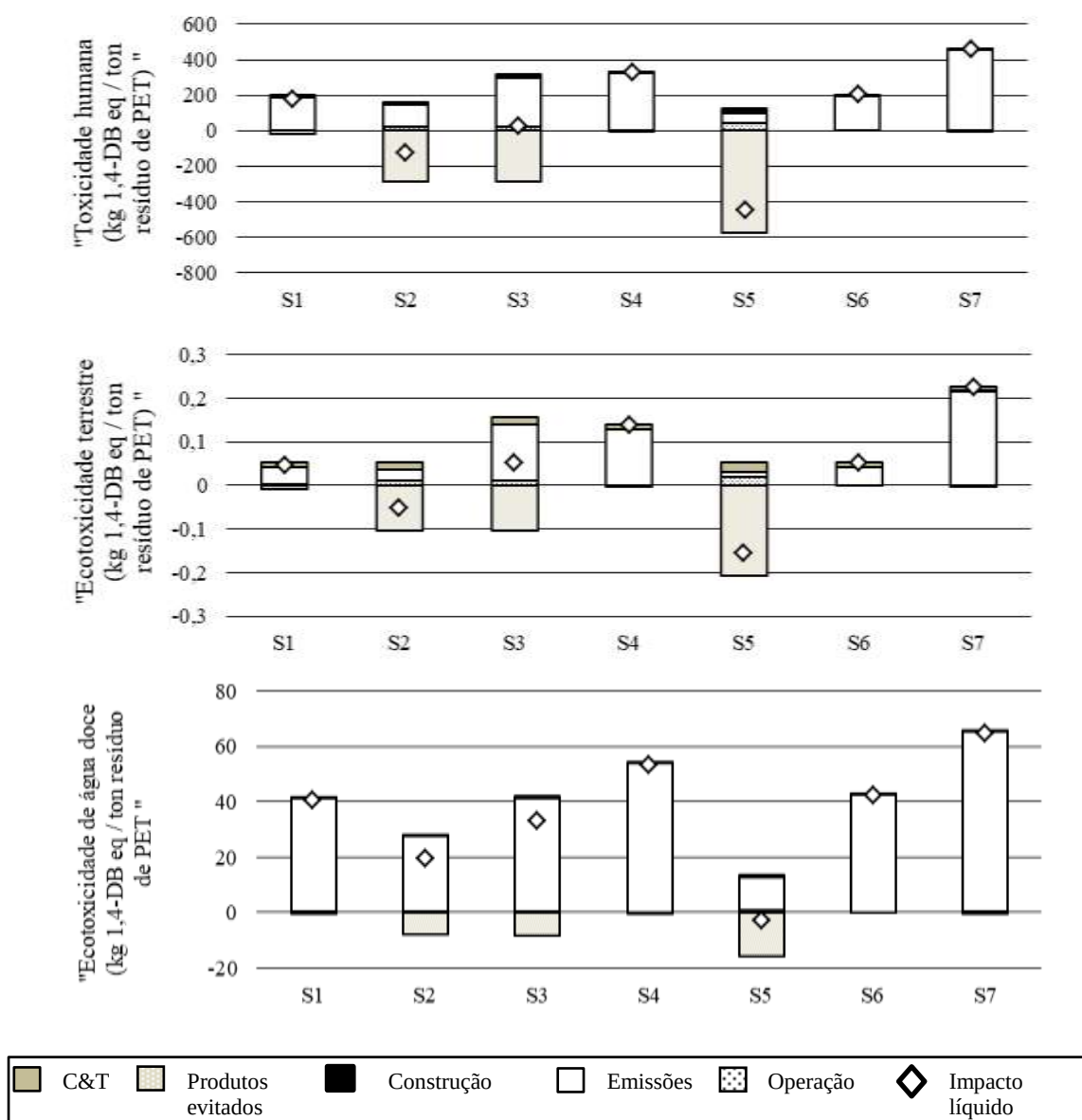


Figura 26: Impacto total para as categorias de toxicidade humana, ecotoxicidades terrestres e de água doce e repartição das contribuições.



O cenário 5 apresentou os menores impactos líquidos para todas as categorias consideradas. Na verdade, os impactos líquidos foram todos negativos para este cenário. O cenário onde todos os resíduos PET são incinerados (S7) apresentou os maiores valores de impacto líquido em todas as categorias, exceto nas categorias de destruição da camada de ozônio e eutrofização de água doce. Nessas duas categorias, S6, o cenário em que todos os resíduos de PET são depositados em aterro, teve os maiores impactos. Os cenários 1, 2 e 4 são combinações de média ponderada dos cenários 5, 6 e 7. Em particular, S1 é 3,6% S5 e 96,4% S6; S2 é 50% S5 e 50% S6; S4 é 50% S6 e 50% S7. O cenário 3 é uma combinação de S5 e S7, com o PET rejeitado em S5 sendo incinerado,

Tabela 12: Resultados de impacto ambiental para todos os cenários. Os valores de impacto são expressos por tonelada (t) de resíduos de PET.

Cenários	Categorias	Das Alterações Climáticas	Destruição do ozônio	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade de água doce
	Unidade	kg CO ₂ e	kg CFC-11e	kg SO ₂ e	kg Pe	kg 1,4-DBe	kg 1,4-DBe	kg 1,4-DBe
S1	Internet	46,0	2,13 E-6	- 4,88 E- 2	- 8,81 E- 3	1 78	4 .51 E-2	40 .6
	Op.	7,3	9.05E-7	5.08E-2	1.13E-3	1,7	1.63E-3	3,79E-2
	Em.	66,1	N / D	1.72E-3	1.63E-4	189	3,95E-2	41,0
	Const.	2,6	4.66E-7	1.65E-2	4,43E-4	0,8	1.26E-4	2.04E-2
	C&T	26,6	1.85E-6	8,59E-2	1.59E-3	6,8	1.13E-2	1.14E-1
	AV	- 56,7	-1. 09 E-6	- 2.04 E-1	-1. 21 E-2	-2 0,7	- 7,48 E-3	- 5,82 E-1
S2	Internet	- 494	- 3,23 E- 6	- 2,41	- 1,47 E-1	-1 25	- 5,15 E- 2	19,6
	Op.	43,5	8.85E-6	2.76E-1	1.37E-2	21,5	1.01E-2	4.37E-1
	Em.	44,3	N / D	6,26E-3	2.27E-3	124	2.58E-2	26,9
	Const.	4,8	4,89E-7	3,43E-2	3,46E-3	7,2	6,59E-4	1,70E-1
	C&T	37,4	2.59E-6	9,92E-2	2.24E-3	9,6	1.59E-2	1.60E-1
	AV	- 788	- 1,52 E-5	- 2,83	- 1,69 E-1	- 287	- 1.04 E- 1	- 8,1
S3	Internet	494	- 3,68 E- 6	- 2,29	- 1,47 E-1	27,9	5,24 E-2	33,0
	Op.	44,9	8,93 E- 6	2,73 E-1	1,42 E-2	22,5	1.03 E-2	4,58E-1
	Em.	1,2 30	N / D	1.62E-1	2,2 7 E-3	278	1.31E-1	40,7
	Const.	5,8	3.35E-7	3,53E-2	4.11E-3	7,9	7,27E-4	1,97E-1
	C&T	35,1	2.43E-6	9.28E-2	2.11E-3	9,0	1.49E-2	1.50E-1
	AV	- 822	- 1,54 E- 5	- 2,86	- 1,70 E-1	- 289	- 1.04 E-1	- 8,5
S4	Internet	1.060	2,17 E- 6	2.35E-1	1,65 E- 3	329	1. 39 E- 1	5 3,5
	Op.	5,7	3,62 E- 7	3,11 E- 2	5,57 E- 4	1 .0	1,16 E- 3	2,51 E- 2
	Em.	1.060	N / D	1.32E-1	N / D	323	1.28E-1	53,6
	Const.	3,3	3.35E-7	1.60E-2	7.46E-4	0,9	1.41E-4	3.15E-2
	C&T	23,9	1.66E- 6	7,95E-2	1.43E-3	6,1	1.01E-2	1.02E-1
	AV	- 28,7	-1. 87 E- 7	- 2.28E-2	- 1,09 E- 3	- 2.0	- 2,68 E- 4	- 3,51E-1
S5	Internet	-1, 420	- 9,01 E- 6	- 4,96	- 2,96 E-1	- 451	- 1,56 E- 1	- 3,1
	Op.	82,6	1.74E-5	5.19E-1	2.72E-2	42,9	1.92E-2	8.66E-1
	Em.	20,9	N / D	1.12E-2	4.53E-3	53,2	1.09E-2	11,7
	Const.	7,1	5,15E-7	5,35E-2	6,72E-3	14,1	1.23E-3	3,33E-1
	C&T	49,1	3.39E-6	1.13E-1	2,95E-3	12,5	2.09E-2	2.10E-1
	AV	-1, 580	- 3.03 E-5	- 5,66	- 3,37 E-1	- 574	- 2.08 E-1	-1 6,2

Tabela 12. Resultados de impacto ambiental para todos os cenários. Os valores de impacto são expressos por toneladas. métrica (t) PET residual (Cont.).

Cenários	Categorias	Das Alterações Climáticas	Destruição do ozônio	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade de água doce
	Unidade	kg CO ₂ e	kg CFC-11e	kg SO ₂ e	kg Pe	kg 1,4-DBe	kg 1,4-DBe	kg 1,4-DBe
S6	<i>Internet</i>	101	2.55E-6	1.35E-1	1,90E-3	201	5,26E-2	42,2
	<i>Op.</i>	4,5	2.89E-7	3,33E-2	1,54 E-4	0,2	9,7 9 E-4	6,94E-3
	<i>Em.</i>	67,8	N / D	1.36E-3	N / D	194	4.06E-2	42,1
	<i>Const.</i>	2,4	4.64E-7	1.51E-2	2.09E-4	0,3	8,48E-5	8,81E-3
	<i>C&T</i>	25,8	1.79E-6	8,48E-2	1.54E-3	6,6	1.09E-2	1.10E-1
	<i>AV</i>	N / D	N / D	N / D	N / D	N / D	N / D	N / D
S7	<i>Internet</i>	2.030	1,80 E-6	3,36E-1	1.39E-3	457	2,26 E- 1	64,7
	<i>Op.</i>	6,8	4. 35 E- 7	2,88 E- 2	9,60 E- 4	1.8	1,34 E- 3	4.33E-2
	<i>Em.</i>	2.050	N / D	2.62E-1	N / D	452	2,16E-1	65,2
	<i>Const.</i>	4,2	2.06E-7	1.68E-2	1.28E-3	1,4	1,98E-4	5,43E-2
	<i>C&T</i>	21,9	1.53E-6	7.42E-2	1.31E-3	5,7	9,31E-3	9,37E-2
	<i>AV</i>	- 57,3	-3. 71 E- 7	- 4.55E-2	- 2,17 E- 3	- 4,0	- 5,35 E- 4	- 7.02E-1
S8	<i>Internet</i>	-1, 420	- 9,10 E- 6	- 4,97	- 2,96 E-1	- 452	- 1,56 E- 1	- 3,1
	<i>Op.</i>	82,6	1.74E-5	5.19E-1	2.72E-2	42,9	1.92E-2	8.66E-1
	<i>Em.</i>	20,9	N / D	1.12E-2	4.53E-3	53,2	1.09E-2	11,7
	<i>Const.</i>	7,1	5,15E-7	5,35E-2	6,72E-3	14,1	1.23E-3	3,32E-1
	<i>C&T</i>	47,7	3.30E-6	1.08E-1	2.87E-3	12,2	2.03E-2	2.05E-1
	<i>AV</i>	-1, 580	- 3.03 E-5	- 5,66	- 3,37 E-1	- 574	- 2.08 E-1	- 16,2
S9	<i>Internet</i>	-1, 420	- 9,24 E- 6	- 4,98	- 2,96 E-1	- 452	- 1,57 E- 1	- 3,1
	<i>Op.</i>	82,6	1.74E-5	5.19E-1	2.72E-2	42,9	1.92E-2	8.66E-1
	<i>Em.</i>	20,9	N / D	1.12E-2	4.53E-3	53,2	1.09E-2	11,7
	<i>Const.</i>	7,1	5,15E-7	5,35E-2	6,72E-3	14,1	1.23E-3	3,32E-1
	<i>C&T</i>	45,8	3.17E-6	9,94E-2	2.75E-3	11,7	1,95E-2	1.97E-1
	<i>AV</i>	-1, 580	- 3.03 E-5	- 5,66	- 3,37 E-1	- 574	- 2.08 E-1	- 1 6,2

em vez de aterrado. Para concisão, os resultados e a discussão se concentraram nos cenários 5, 6 e 7.

Para a categoria de mudanças climáticas, o principal contribuidor geral para o S5 foram os produtos evitados. Do lado da carga, os principais contribuintes foram operação (52%), C&T (31%) e emissões (13%). Para S6 houve apenas encargos, sendo as emissões (67%) e C&T (26%) as principais. Para o S7, o principal contribuinte foram as emissões, que responderam por 98% de todos os encargos. Houve uma pequena compensação (3% da carga total) devido aos produtos evitados. Deve-se notar que, para S1, o impacto líquido foi de apenas 45% do impacto líquido de S6.

Com relação à destruição da camada de ozônio, não houve contribuições das emissões diretas para o impacto total em todos os cenários. Em geral, os principais contribuintes foram operação e C&T, do lado do ônus (valores de impacto positivo), e produtos evitados do lado do benefício (valores do impacto negativo). Para S6 e S7, C&T foi a carga principal (70% e 85% da carga total, respectivamente). Para S5, a operação foi o principal fardo (82%). Todos os cenários propostos (exceto S6) tiveram impactos líquidos menores na destruição do ozônio do que o cenário base (S1). No entanto, maiores reduções foram obtidas quando a reciclagem foi considerada do que quando a incineração foi considerada.

Em relação à categoria de acidificação terrestre, para S5 os produtos evitados foram 8 vezes maiores que a carga total. Os principais contribuintes do lado dos encargos foram operação (74%) e C&T (16%). Para S6, os principais contribuintes foram C&T (63%) e operação (25%). Para S7, as emissões (69%) foram a carga que mais contribuiu. Na categoria de eutrofização de água doce, o produto evitado para S5 também foi muito significativo, sendo a operação (66%) e a construção (16%) os principais encargos. As cargas para S6 e S7 eram muito pequenas, sendo uma ordem de magnitude menor do que as cargas para S5. Os impactos líquidos para S1 foram negativos para as categorias de acidificação terrestre e eutrofização de água doce.

Para a toxicidade humana, as emissões foram a principal carga para S5, S6 e S7, representando 43%, 96% e 98% da carga total, respectivamente. Para S5, a operação foi outra carga significativa (35%), e os produtos evitados foram 4,7 vezes maiores que a carga total. Para a ecotoxicidade terrestre e de água doce, o principal ônus foi das emissões para todos os cenários, com exceção de S5 na categoria de ecotoxicidade terrestre. Para este caso específico, C&T e operação foram os principais encargos. Os

produtos evitados para os cenários com reciclagem forneceram compensações maiores para a ecotoxicidade terrestre do que para a ecotoxicidade de água doce.

3.4.4.2 Discussão

Algumas observações e tendências são comuns a todas as categorias de impacto. Para a C&T, a reciclagem apresentou maior impacto do que o aterro e a incineração, devido às longas distâncias de transporte dos fardos das cooperativas de triagem em Bauru para as indústrias de reciclagem em outras cidades. Para a incineração, o produto evitado foi a eletricidade, supostamente produzida em usinas hidrelétricas. A energia hidrelétrica tem menos impactos na maioria das categorias consideradas do que as usinas tradicionais, resultando em pequenas compensações. Além disso, a contribuição da fase de operação para a incineração foi insignificante porque o calor utilizado na instalação de incineração foi considerado como sendo gerado pela combustão de resíduos de PET, de modo que nenhum fornecimento externo foi necessário.

Das Alterações Climáticas

As emissões foram um fardo considerável para o S7 na categoria de mudança climática porque quase todo o carbono no PET é oxidado e liberado na atmosfera durante a incineração. Durante o aterro de resíduos de PET, devido à sua baixa degradabilidade, apenas 1-2% do carbono é liberado em 100 anos (SUNDQVIST, 1999). O inventário de emissões atmosféricas utilizado no presente estudo assumiu um valor padrão de 1% para a degradabilidade do PET em aterros sanitários (DOKA, 2007). Para a reciclagem mecânica, a estrutura molecular do PET não muda, portanto não há emissão de carbono. Em todos os cenários em que a reciclagem de PET é considerada, o PET rejeitado pelas cooperativas de triagem e pela indústria de reciclagem é depositado em aterro ou incinerado, e quaisquer contribuições de emissões diretas para a categoria de mudanças climáticas derivam de qualquer uma dessas duas opções.

Comparando S5 e S6, quando ocorre a reciclagem de resíduos de PET (S5), os encargos devido à operação, construção e C&T aumentaram 18,3, 2,9 e 1,9 vezes, respectivamente, em comparação com o aterro de resíduos de PET (S6). Para operação e construção, esse aumento é devido ao maior uso de eletricidade e maior infraestrutura

necessária durante a separação e reciclagem do PET. Para a C&T, o aumento se deve ao transporte de fardos de Bauru para recicladores de outras cidades. Embora os encargos tenham aumentado, o impacto líquido diminuiu devido à grande compensação (-1.580 kg CO₂ eq./t PET residual) fornecida pelo produto evitado, substituindo o PET de base fóssil. O impacto da produção de PET fóssil nas mudanças climáticas é resultado das emissões de CO₂ e CH₄ durante a fabricação de matérias-primas, em particular xileno para a produção de ácido tereftálico. Substituindo este produto por PET reciclado, essas cargas são evitadas. A compensação fornecida pela incineração (-69 kg CO₂ eq./t PET residual) foi comparativamente muito menor.

Considerando o S1, mesmo uma pequena quantidade de reciclagem foi capaz de melhorar significativamente os impactos nas mudanças climáticas, resultando em um impacto líquido de 46 kg CO₂ eq./ t resíduos de PET. Em comparação, o cenário 6, que considerou 100% de aterro, teve um impacto líquido de 101 kg CO₂ eq./ t resíduos PET. Para os outros cenários, uma mistura de reciclagem de PET e incineração (S3) resultou em um impacto líquido maior do que o cenário atual (S1), enquanto uma mistura de reciclagem de PET e aterro (S2) apresentou um impacto líquido menor do que S1. Portanto, se não for possível atingir altas taxas de reciclagem, seria melhor depositar os resíduos de PET em aterro do que incinerá-los.

Destruição do ozônio

A destruição da camada de ozônio é causada pela liberação de hidrocarbonetos halogenados e, como essas substâncias não são emitidas durante o tratamento de resíduos de PET, nenhum dos cenários resultou em qualquer ônus de emissões diretas para esta categoria. Para o S5, a grande contribuição (82% da carga total) da fase de operação ocorre devido à produção de NaOH, que é utilizado no processo de limpeza do PET nas instalações de reciclagem. O impacto causado pelo C&T na redução da camada de ozônio vem da produção de combustíveis fósseis usados em caminhões de transporte. A grande compensação fornecida pela reciclagem de PET (S5) vem da produção evitada de PET de base fóssil, que libera compostos de CFCs durante o processo de refinaria de petróleo.

Acidificação terrestre e eutrofização de água doce

A acidificação terrestre está relacionada à emissão de substâncias, geralmente contendo N e S, que diminuem o pH do solo na deposição, impactando a biodiversidade vegetal (ROY et al., 2012). Em relação às cargas, a reciclagem (S5) apresentou impactos maiores do que o aterro (S6) e a incineração (S7), principalmente para a fase de operação. Nesta fase, 90% dos impactos vieram da operação nas indústrias de reciclagem, que inclui o aproveitamento do calor e produtos químicos de lavagem (NaOH, H₂SO₄). A incineração (S7) apresentou maior ônus do que o aterro (S6) devido às emissões diretas de NO_x e SO₂, que são de 0,46 kg e $1,57 \times 10^{-3}$ kg, respectivamente, por t de resíduos de PET incinerados (Doka, 2013). Esses valores de emissão são muito menores para um aterro: $1,45 \times 10^{-3}$ Kg NO_x e $1,93 \times 10^{-4}$ kg SO₂ por t de resíduos de PET depositados em aterro (DOKA, 2007). O processo de produção de PET de base fóssil tem impactos significativos de acidificação (11,5 kg SO₂ eq por t PET produzido), a maior parte (92%) proveniente da produção de matérias-primas utilizadas na produção de PET (EG e ATP), o que explica as grandes compensações proporcionadas pelos produtos evitados nos cenários que consideram a reciclagem do PET.

A eutrofização da água doce é causada pelo acúmulo de nutrientes (principalmente P e N) nos corpos d'água, causando crescimento excessivo de algas e, conseqüentemente, condições anóxicas na água (PRETTY et al., 2003). As tendências observadas foram semelhantes às discutidas para a acidificação. No entanto, a grande compensação obtida com a reciclagem de PET veio das emissões evitadas de fosfato (PO₄³⁻) durante o tratamento de resíduos da produção de PET de base fóssil. Houve impactos insignificantes de eutrofização de água doce das emissões durante a incineração de PET porque o método ReCiPe não tem fatores de impacto para substâncias contendo N (como NO_x, que é emitido durante a incineração) para o ar para esta categoria. Para o aterro de PET, também houve impactos insignificantes para a eutrofização porque o lixiviado produzido é tratado e a aplicação do composto gerado durante o tratamento do lixiviado não foi considerada.

Toxicidade humana e ecotoxicidade

A grande contribuição das emissões para os impactos de toxicidade para o cenário de incineração (S7) foi devido à liberação de substâncias tóxicas, principalmente vanádio, titânio e antimônio. Esses metais estão presentes nos catalisadores usados na unidade de de-NOx e também em pequenas quantidades nos resíduos de PET. Para aterro (S6), os impactos da toxicidade decorrem das emissões diretas para a água de substâncias, como Mn, Pb, Ba, Cu, Zn e Hg durante o tratamento de lixiviado na ETAR. O PET possui um teor de água insignificante, portanto, não gera quantidades significativas de lixiviado. No entanto, o PET é depositado em aterro com outros resíduos que geram lixiviado, e pequenas quantidades de impurezas presentes no PET (como Na, V, Ti, Cl, Sb, Zn, Mn, Cu e Ni) podem lixiviar para o lixiviado. O inventário utilizado para aterro de resíduos de PET assumiu uma quantidade média de lixiviado, mas corrigiu a composição desse lixiviado para ser específico para o resíduo (DOKA, 2007).

Para os cenários em que ocorre a reciclagem, os encargos para a toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce foram principalmente devido às emissões. Essas cargas vieram da deposição em aterro dos resíduos de PET rejeitados. Os processos de triagem e reciclagem não têm emissões diretas; no entanto, sua operação contribuiu para a toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre. Nesses casos, os encargos estavam relacionados ao uso de energia nas indústrias de reciclagem e produção de substâncias de limpeza, como NaOH e sabão. C&T foi outro grande fardo para a ecotoxicidade terrestre devido às emissões de metais pesados no ar e no solo durante a abrasão dos pneus e desgaste do freio. A compensação fornecida pela reciclagem do PET foi devido às emissões evitadas do tratamento de resíduos da produção de PET de base fóssil. Para a toxicidade humana, a principal emissão evitada foi de manganês para a água. Para ecotoxicidade terrestre, foi Zn e Cu para o solo, enquanto para ecotoxicidade de água doce, foi Cu para a água.

3.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO

Alcançou-se o objetivo de se estabelecer um *framework* para avaliação do ciclo de vida de resíduos de garrafa pet. Onde se estabeleceu uma estrutura seguindo as

orientações da ISO 14040. Também foi possível aplicar o *framework* estabelecido sobre os estudo de caso na cidade de Bauru/SP.

No estudo de caso observou-se que os cenários de reciclagem superaram os cenários de incineração em todas as categorias de impacto analisadas, indicando que a reciclagem pode ser uma opção melhor do que a incineração, do ponto de vista ambiental, para o município de Bauru. A deposição em aterro foi menos impactante do que a incineração para todas as categorias, com expectativa de redução da camada de ozônio e eutrofização de água doce, embora os valores de impacto líquido fossem próximos para ambas as categorias. Os impactos ambientais também diminuíram conforme o aumento de capacidade de reciclagem e consequente redução na quantidade de resíduos de garrafas PET enviadas ao aterro. Assim, a reciclagem parece ser a melhor opção. Porém, o índice de reciclagem na cidade é muito baixo devido à falta de uma cultura de coleta seletiva, o que dificultaria muito o processo de coleta de recicláveis, e ao fato de, pela legislação em vigor, as cooperativas de reciclagem não poderem ser administradas por empresas privadas, devendo ser administrados por associações de catadores, que geralmente carecem de recursos monetários para expandir e manter rapidamente a capacidade de produção. Este estudo pode chamar a atenção de formuladores de políticas e reguladores para a necessidade de permitir serviços privados de triagem ou de fornecer mais financiamento e treinamento às cooperativas, bem como educar a população sobre a importância da separação na fonte.

Este trabalho não considerou a quantidade de resíduos de PET coletados pelos catadores informalmente, devido à falta de informações e dados oficiais da cidade de Bauru. Sugere-se que trabalhos futuros busquem estimar o volume e a destinação dos resíduos de PET coletados dessa forma em Bauru.

4. ACV SOCIAL DA GESTÃO DO RESÍDUO DA GARRAFA PET PÓS-CONSUMO

4.1 INTRODUÇÃO

As empresas estão envolvidas num mercado de alta competição, onde a busca por ferramentas que potencializam seu desempenho competitivo passa a ser uma constante. Neste contexto, as decisões empresariais geram impactos sobre suas operações afetando sua rentabilidade, a maneira que as pessoas interagem no ambiente de trabalho e com o meio ambiente.

Inicialmente os impactos econômicos eram majoritariamente os únicos avaliados por ferramentas de desempenho, posteriormente foram incluídos os impactos ambientais no desempenho das empresas. E mais recentemente os impactos sociais têm sido introduzidos na medição de desempenho, sendo mensurados através do bem estar social, na maneira como as pessoas se relacionam, no clima empresarial, entre outros aspectos relevantes.

Com a evolução da humanidade esses impactos (Econômico, Social e Ambiental) ganharam importância. E assim formaram o tripé da sustentabilidade, formado pela união dos pilares: Econômico, Meio ambiente e Social (ELKINGTON, 1994). Onde ferramentas como a Avaliação do Ciclo de Vida são aplicadas a cada um destes aspectos, comparando negócios diferentes e sua aderência a esses pilares. (COSTA; QUINTEIRO E DIAS, 2019).

Essas ferramentas analíticas e sistemáticas foram desenvolvidas para ajudar as empresas a cumprir essa tarefa de atender o tripé sustentável. Isso inclui avaliação do ciclo de vida aplicada à área Ambiental, Social e Econômica através das respectivas ferramentas: ACV Ambiental para desempenho meio ambiente, ACV Econômica para o desempenho financeiro e ACVS para avaliação do desempenho social. (FOOLMAUN; RAMJEEAWON, 2013b).

Para esta pesquisa foi selecionada a ferramenta ACVS (Avaliação do ciclo de vida social), com a finalidade de determinar a gestão de resíduos de garrafa PET pós-consumo mais eficientes e socialmente benéfica na Cidade de Bauru avaliando-se 9 cenários.

Segundo o IBGE (2020) Bauru é um centro regional do estado de São Paulo, populoso (379.277 habitantes, dados 2020) onde há um alto nível de escolarização (96,9

%, última aferição ano de 2010). Possui alto nível de desenvolvimento econômico (Produto interno Bruto de 13.771.752,86, últimos dados disponíveis ano de 2017). Porém, com uma distribuição de renda desigual: 1/5 mais pobre da população detém 9% da renda, enquanto o 1/5 mais rico se apropria de 42% (PLANO DIRETOR PARTICIPATIVO, 2020). Além disso, possui baixo nível de reciclagem, apenas 2,8% do resíduo sólido urbano (PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO, 2016).

Esse cenário apresenta uma desarmonia entre os pilares de sustentabilidade. Logo se torna viável a utilização da ferramenta ACV para auxiliar a decisão de medidas de sustentabilidade.

Os objetivos do estudo foram: descobrir a opção de descarte que causa menos impactos sociais; comunicar os resultados para as indústrias de engarrafamento; ajudar a administração pública de Bauru a formular decisão política apropriada quanto ao descarte da garrafa.

4.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SOCIAL (ACVS)

A Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) tem sido uma metodologia relevante no tocante a fornecer suporte à tomada de decisão quanto aos produtos, ou mesmo no intuito de melhorar os efeitos sociais do ciclo de vida de um produto (PETTI; SERRELI; DI CESARE, 2018).

Observando as necessidades de melhoria dos aspectos sociais a UNEP/ SETAC elaborou diretrizes para a execução da ACVS, onde destacou como foco a avaliação dos aspectos sociais e também dos aspectos socioeconômicos dos produtos, incluindo seu reflexo sobre os processos a montante e a jusante (UNEP/SETAC, 2009).

Grandes partes dos estudos realizados nos últimos anos se basearam nas diretrizes da UNEP/SETAC e ISO 14040. Como foi elencado na revisão estruturada da literatura conduzida por Petti *et al* (2018). Ainda a revisão estruturada da literatura conduzida pelos pesquisadores Huertas-Valdivia *et al.*, (2020), entre os anos de 2003-2018, revelou que as diretrizes do PNUMA / SETAC foram um marco para o crescimento das publicações das ACVS.

Estudos mais recentes como o de Prasara-A e Gheewala (2018) e Neugebauer *et al.* (2017), também utilizam as diretrizes da UNEP/SETAC (2009) e categorias e subcategorias UNEP/SETAC (2013).

No entanto, Arcese et al. (2017) apontam que ainda precisa ser consolidada a utilização da ferramenta: Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS). Os autores demonstram que o índice de publicação aumentou nos últimos anos, porém a falta de um padrão gerou o surgimento de várias abordagens na utilização da ACVS.

Arcese et al. (2013) salientam que como não existe uma norma específica para a aplicação do ACVS utiliza-se a ISO 14.040 para o estabelecimento das etapas de trabalho, a saber: Definição de meta e escopo; Análise de inventário; Avaliação de impacto e Interpretação.

4.2.1 Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo

Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo é um assunto recente. Poucos trabalhos versaram sobre todos pilares de sustentabilidade, conforme mostra o Quadro 3. Assim, neste quadro apresenta-se uma revisão da bibliografia sobre a avaliação do ciclo de vida em cenários de destinação final dos resíduos de PET. Nessa tabela destacam-se as opções consideradas de descarte e os respectivos cenários recomendados quanto ao descarte observando os critérios de desempenho elencados.

Quadro 3: Resumo da revisão da literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida em resíduos de PET.

Autores	Local	Cenários Considerados	Opção recomendada	Desempenho
Foolmaun e Ramjeeawon (2013a)	Maurício	-100% aterro (L) -75% incineração (I) / 25% L -40% de produção de flocos / 60% L -75% de produção de flocos / 25% L	75% de produção de flocos e 25% de aterro sanitário	Ambiental e Social
Foolmaun e Ramjeeawon (2013b)	Maurício	-100% aterro (L) -75% incineração (I) / 25% L -40% de produção de flocos / 60% L -75% de produção de flocos / 25% L	75% de produção de flocos e 25% de aterro sanitário	Econômico, Ambiental, Social

Quadro 3: Resumo da revisão da literatura sobre Avaliação do Ciclo de Vida em resíduos de PET.
(Continuação).

Autores	Local	Cenários considerados	Opção recomendada	Desempenh o
Kuczenski; Geyer (2013)	EUA	-Aterro -Recuperação -Reciclagem	Reciclagem	Ambiental
Hottle et al. (2017).	EUA	-Aterro -Reciclagem	Reciclagem	Econômico, Ambiental
KANG et al. (2017)	EUA	-Reciclagem	Reciclagem (Maior foco na eficiência de reciclagem que na coleta)	Operacional, Econômico
Komly et al. (2012)	França	-Aterro - Reciclagem (mecânica/química a térmica) -Incineração	Reciclagem	Ambiental
Chilton et al. (2010)	Inglaterra	-Reciclagem de circuito fechad o -Incineração	Reciclagem de circuito fechado	Ambiental
Shen et al. (2010)	Países Baixos	-Reciclagem de loop aberto (mecânica , semimecânica , de volta ao oligômero , de volta ao monômero)	Reciclagem mecân ica	Ambiental
Nakatani et al. (2010)	Japão	-Reciclagem -Incineração -Aterro	Reciclagem	Ambiental
Park e Gupta (2015)	EUA	-Incineração -Reciclagem	Incineração em nível local (Redução de demanda energética) Reciclagem em nível regional	Econômico, Ambiental, Social

Os estudos observados no Quadro 3 demonstram a aplicação do método de ACV (avaliação do ciclo de vida) em resíduos de Tetraftalato de polietileno concentram-se predominantemente sobre o pilar Ambiental (90%).

Já para os pilares de sustentabilidade com vertente econômica foram apenas quatro trabalhos, a saber: Hottle et al. (2017); Foolmaun e Ramjeeawon (2013b), Kang et al. (2017) e Park e Gupta (2015).

E, por fim o eixo de menor aplicação da ferramenta de Avaliação do Ciclo de vida foi o social, apenas os trabalhos de Park e Gupta (2015) e Foolmaun e Ramjeeawon (2013a). Neste trabalho de abordagem social Park e Gupta (2015) construíram uma visão sistêmica dos aspectos sustentáveis (aspectos ambientais e socioeconômicos) Porém, a análise de dados quanto a aplicação da ACV se restringiu ao pilar ambiental.

Enquanto que apenas o trabalho de Foolmaun e Ramjeeawon (2013b) fez uma avaliação do ciclo de vida completa sobre os aspectos ambientais, sociais e econômicos. Em um trabalho anterior esse autor fez uma integração relevante dos aspectos socioambientais (FOOLMAUN; RAMJEEAWON, 2013a). Trabalho esse que seguiu as diretrizes internacionais para aplicação da ACV (ABNT, 2014a), e para a ACVS seguiu os princípios da UNEP/SETAC (2009, 2013) e a normalização da ISO 14040 (ABNT, 2014a). Princípios esses utilizados em predominância na literatura. Logo, foram utilizadas neste trabalho essas diretrizes para fins de comparação de resultados.

4.2.2 Avaliação do ciclo de vida social (ACVS) da gestão do resíduo da garrafa PET pós-consumo no Brasil

No Brasil, diante da necessidade do avanço de medidas que pudessem nortear o estabelecimento da sustentabilidade, foi promulgada a política nacional dos resíduos sólidos no ano de 2010, onde se estabeleceu parâmetros para que as partes interessadas pudessem tomar ações para melhorar o desenvolvimento sustentável do país. Como principais medidas destacaram-se:

- Artigo 06 – Foram apontados os princípios norteadores da PNRS. Onde se destaca o Princípio do poluidor pagador. Onde cada produtor de embalagens reciclagem deve atuar de maneira que seja responsável pela destinação do seu material pagando por isso. E nesse mesmo artigo, segue como princípio o protetor-recebedor. Entidade que faz a destinação dos materiais recicláveis deve receber por isso.
- Artigo 7. Estabelece os objetivos a serem implantados pela PNRS. Esse item é de suma importância pois baliza as Metas para coleta seletiva

estabelecimento de rede de tratamento final dos resíduos sólidos para as prefeituras.

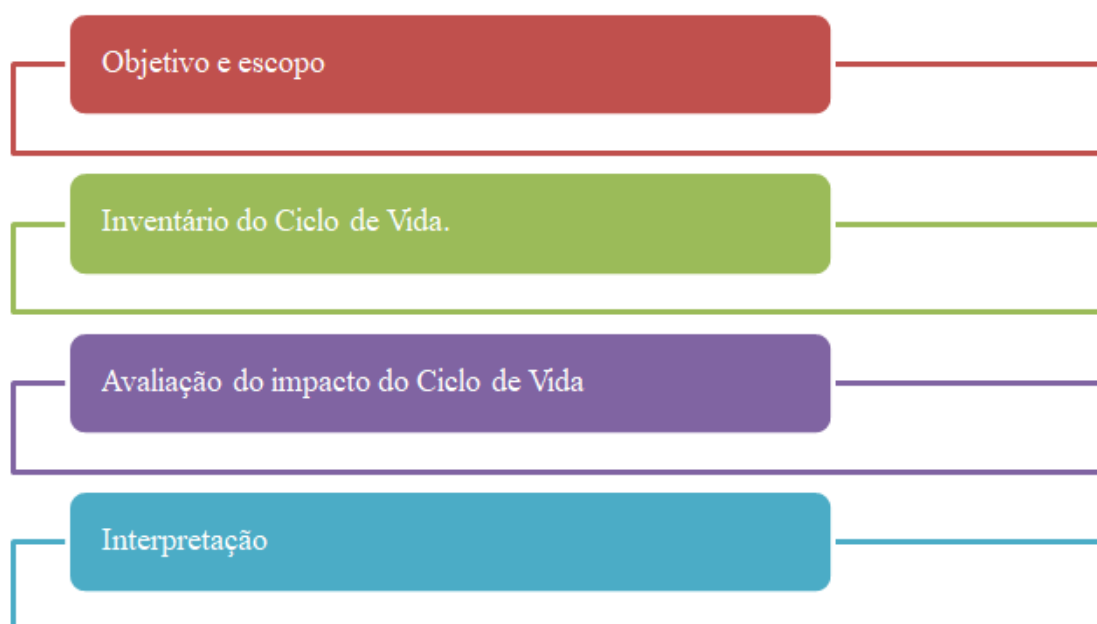
- Artigo 8. Delineia os instrumentos a serem utilizados para medir a evolução da PNRS nas ações implementadas nos planos municipais de saneamento básico e nos planos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Um dos resíduos sólidos de grande relevância para o contexto brasileiro é o resíduo de polietileno teraftalado (PET), o qual tem grande importância social, econômica e ambiental, conforme descrito anteriormente nesta tese. Porém, poucos estudos têm direcionado o estabelecimento de análises sustentáveis em torno de resíduos PET.

4.3 FRAMEWORK PARA APLICAÇÃO DA ACV SOCIAL

A estrutura deste *framework* de ACVS segue as diretrizes das UNEP/SETAC (2009, 2013), e também as diretrizes das normas ISO 14.040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b). Onde sua estruturação segue a descrição da ISO 14044 em quatro etapas: Objetivo e escopo; Análise de inventário; Avaliação de impacto e Interpretação. As etapas do *Framework* para aplicação da ACV Social são expressos na Figura 27.

Figura 27: *Framework* metodológico para realização da ACV - Social



I - Objetivo e escopo

Essa fase deverá ser realizada após a execução de uma revisão estruturada da literatura para verificar os pontos de lacuna e trabalhos relevantes na área.

A unidade funcional e os três cenários de destinação final (Reciclagem, Aterro e Incineração) foram mantidos conforme *framework* de ACV Ambiental, bem como os limites dos sistemas, descritos no Apêndice A2.

O objetivo deste *framework* de ACV social é avaliar os impactos sociais de diferentes opções de gestão para resíduos de garrafa PET pós-consumo, considerando as alternativas de descarte na localidade do estudo de área.

Nesse item se torna necessário caracterizar o estudo de área, explicando suas características dos locais, e alternativas de destinação final para determinar o fluxo de trabalho dentro de cada área de destinação final. Nesta estrutura foram utilizadas as alternativas de Incineração, Reciclagem e Aterro.

- Aterro: Descarte dos resíduos orgânicos da coleta convencional.
- Reciclagem: Destinação aos resíduos recicláveis de garrafa PET colhidos através da modalidade de coleta seletiva
- Incineração: Descarte dos resíduos orgânicos da coleta convencional.

II- Inventário do Ciclo de Vida

Nessa etapa deve-se levantar as entradas do sistema para que assim possa se estabelecer os fluxos dentro do escopo e objetivo de pesquisa escolhidos na fase I (Objetivo e escopo).

O apêndice A3 contém elementos para colaborar no levantamento dos dados de inventário, para a aplicação dentro do estudo da localidade deve se preencher os pontos destacados em verde em cada célula do Excel (Apêndice A3).

A quantidade de questionário empregada tem que ser proporcional a quantidade de pessoas dentro da população estudada, seguindo o princípio da proporção.

Nesse *framework* têm-se três grupos:

- Grupo 1 - Coleta Orgânica +Aterro.
- Grupo 2 - Coleta Orgânica + Incineração.
- Grupo 3 - Coleta Seletiva +Cooperativas

Para o emprego da quantidade de questionário utiliza-se a calculadora Raosoft, onde devem ser utilizados como elementos de entrada para obter a amostra: índice de confiança e percentagem de erro.

III- Avaliação do Ciclo de Vida

Seguindo as diretrizes da UNEP /SETAC (2009, 2013), utilizou-se as categorias Trabalhadores, Sociedade e Comunidade Local, e suas respectivas subcategorias Trabalho infantil, Salário justo, Trabalho forçado, Saúde e segurança, Benefício social / segurança social, Discriminação, Contribuição para a economia e Desenvolvimento e Envolvimento da comunidade. As categorias, subcategorias e indicadores empregadas neste *framework* são descritos no Apêndice 3.

De posse da quantidade de cada grupo devem ser aplicados os questionários através de entrevistas. Os dados devem ser lançados nos campos em verde destacados na aba inventário do Apêndice A3 (Está destacado de verde os locais de preenchimento).

IV- Interpretação

A planilha presente no apêndice A3 oferecerá os resultados das percentagens de cada grupo de trabalho estudado, bem como a respectiva pontuação.

De posse dessas informações segue-se para comparação das categorias entre os cenários. E por fim análise da tabela de pontuação final onde tem o desempenho de cada cenário, onde é possível classificar cada cenário, ficando em primeiro o que tiver a maior pontuação, e assim por diante. A pontuação final fica na aba: Pontuação Final.

4.4 APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK* DA ACV AMBIENTAL NA CIDADE DE BAURU .

4.4.1 Objetivo e escopo

A etapa de Objetivo e Escopo contém a caracterização do estudo de área, referência normativa, Objetivo, Limites do sistema e descrição dos cenários.

4.4.1.1 Caracterização da área de estudo

Esse estudo foi realizado sobre a cidade de Bauru, Estado de São Paulo, Brasil. Esta cidade se destaca por ser um centro regional da unidade administrativa do centro Oeste Paulista. Teve a produção a movimentação de 96.274 toneladas de reciclados no ano de 2019 coletados e contabilizados por entidades vinculadas à administração pública municipal (MARTIN et al., 2021).

A coleta de resíduos sólidos é administrada pela secretaria de meio ambiente da cidade onde tem realizado serviço oficialmente pela: (1) Coleta Convencional realizada pela empresa de desenvolvimento urbano e rural da cidade (EMDURB). Essa etapa coleta-se predominantemente material orgânico, porém evidenciou-se em visita ao aterro presença de material reciclado. Essa etapa é realizada porta a porta. (2) Coleta Seletiva de materiais recicláveis realizada pela EMDURB também realizada de porta a porta . (3) A ASCAM também realiza a coleta seletiva de materiais recicláveis na modalidade porta a porta. (4) Coleta Seletiva de materiais recicláveis Ecopontos. Entrega voluntária de cada cidadão nos 8 locais geograficamente distribuídos na cidade.

Após a coleta dos materiais reciclados, esses são levados para as seguintes destinações:

- Aterro. Localizado na Cidade vizinha de Piratininga;
- Cooperativas de Reciclagem, localizadas na cidade de Bauru (Cootramat, Cooperbau e Coopeco).
- Nesse estudo foi adicionada a destinação de Incineração para efeitos de comparação de cenários, utilizando se os dados de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a).

A situação de vulnerabilidade social é um problema de grande relevância na cidade. Onde muitos cidadãos acabam por fazer a coleta seletiva informal no intuito de gerar renda. Segundo a Secretaria Municipal do Bem Estar Social os dados constantes no CadÚnico existem 341 famílias cadastradas como catadores de material reciclável. Sendo 79 famílias não beneficiárias do Programa Bolsa Família e 262 famílias beneficiárias do Programa Bolsa Família.

Para esse estudo foram contabilizados os valores referentes aos dados formais colhidos junto à prefeitura municipal.

4.4.1.2 Referência normativa ACVS

A condução deste estudo de ACVS seguiu as diretrizes das UNEP/SETAC (2009, 2013) seguindo as referências das normas ISO 14040 (ABNT, 2014a) e ISO 14044 (ABNT, 2014b). Sendo estruturada nas quatro etapas: Definição de meta e escopo; Análise de inventário; Avaliação de impacto e Interpretação.

Os indicadores sociais e metodologia de interpretação seguiram os passos indicados por Foolmaun e Ramjeeawon (2013a).

4.4.1.3 Objetivo

Nessa etapa foram estabelecidos os objetivo do trabalho a ser realizado, a saber:

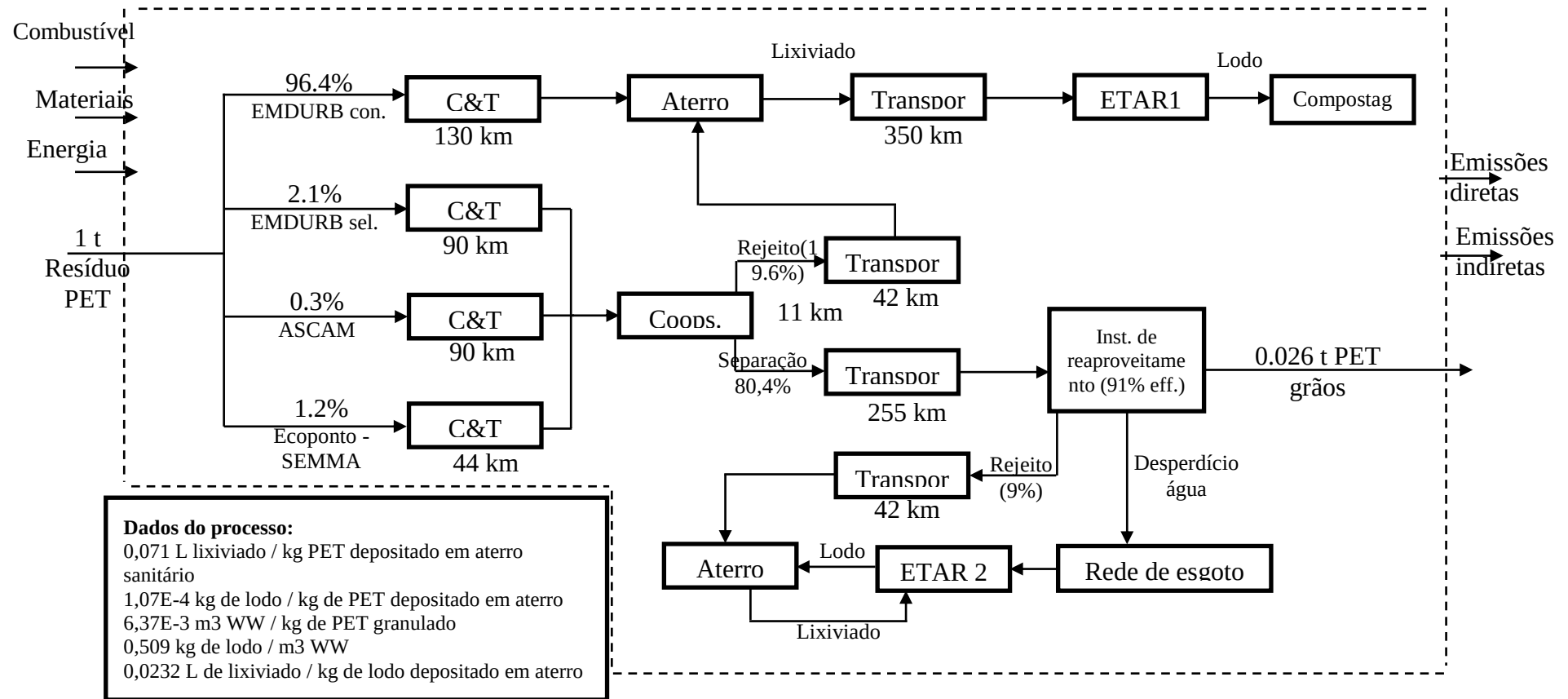
- Realizar a avaliação do ciclo de vida social de três cenários de descarte de garrafas PET usadas; e Determinar a opção de descarte socialmente consistente.

A unidade funcional e os três cenários de destinação final (Reciclagem, Aterro e Incineração) foram mantidos conforme trabalho realizado de ACV-Ambiental realizada em Martin *et. al* (2021) e a apresentado no Capítulo 4 desta tese. Onde se tem 9 cenários de disposição final a saber:

- 1) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,
- 2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;
- 3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;
- 4) 50% para aterro, 50% para incineração;
- 5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);
- 6) 100% para aterro;
- 7) 100% para incineração,
- 8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva);
- 9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).

A Figura 15 representa as fronteiras do sistema em seu cenário base (Cenário 1).

Figura 15. Limite do sistema para o cenário base (S1).



4.4.2 Inventário do ciclo de vida

A seleção de categorias e subcategorias seguiu as diretrizes internacionais da UNEP/SETAC (2009, 2013).

Onde as próprias diretrizes da PNUMA / SETAC sobre ACVS evidenciam que a escolha deve ser realizada de acordo com o objetivo proposto na pesquisa (UNEP/SETAC, 2009). E foi realizado utilizando esse parâmetro, filtrando as categorias conforme o trabalho mais relevante e próximo ao objeto de pesquisa.

Conforme a Quadro 4 foram selecionadas as categorias elencadas pelas diretrizes do UNEP /SETAC: Trabalhadores, sociedade e Comunidade Local, bem como os subcategorias Trabalho infantil, Salário justo, Trabalho forçado, Saúde e segurança, Benefício social / segurança social, Discriminação, Contribuição para a economia e Desenvolvimento e Envolvimento da comunidade. Essas subcategorias foram eleitas observando o trabalho de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a), destacadas no Quadro 4.

Quadro 4: Indicadores de categorias e subcategorias de partes interessadas

Categorias de Stakeholder	Indicadores de subcategoria	Indicador
Trabalhadores	Trabalho infantil	Porcentagem de trabalho infantil na organização
	Salário justo	Satisfação nos salários pagos pela organização
	Trabalho forçado	Se os trabalhadores são forçados a trabalhar
	Saúde e segurança	• Conscientização sobre questões de saúde e segurança;
		• Consciência das etapas / protocolo a seguir em caso de emergência / acidentes
		• Porcentagem de acidentes / lesões na organização
		• Uso de equipamento de proteção
	Benefício social / segurança social	Listas de benefícios sociais oferecidos aos trabalhadores
	Discriminação	Existência de discriminação sexual durante o recrutamento de trabalhadores
Sociedade	Contribuição para a economia e	Número de empregos criados
Comunidade local	Envolvimento da comunidade	Porcentagem do fundo de Responsabilidade Social Corporativa gasto em projetos

Fonte: UNEP/SETAC (2009; 2013).

Ainda no Quadro 4 é possível ver a descrição de cada indicador explicando como cada indicador deverá ser medido.

Seguindo os passos de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) foi elaborado um questionário com a linguagem simples e envolveu perguntas do tipo 'sim' ou 'não', pois foi aplicado a trabalhadores com formação acadêmica muito baixa. O questionário foi aplicado em: Trabalhadores do aterro sanitário, Trabalhadores do Incinerador e Trabalhadores das cooperativas.

A população desses trabalhadores foi estimada em 725 pessoas, conforme dados coletados localmente. O Cenário Incineração não existe ainda na cidade de Bauru, logo utilizou-se dos dados secundários coletados do trabalho de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a), e o restante foi coletado localmente. O tamanho da amostra foi definido utilizando a calculadora Raosoft, consequentemente foram administrados 97 questionários.

4.4.3 Avaliação de impacto

O método criado por Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) está de acordo com as diretrizes do UNEP/SETAC sobre ACVS, conforme descrito a seguir:

Esta metodologia é baseada em um sistema de pontuação e avalia o desempenho de uma empresa em relação às subcategorias selecionadas. Esta metodologia visa converter informações qualitativas de inventário em dados quantitativos de inventário social e socioeconômico e agregando-os usando um sistema de pontuação (FOOLMAUN e RAMJEEAWON, 2013a, p.).

O autor detalha que a finalidade desta metodologia está em agregar os resultados de cada categoria em números normalizados e assim ter um resultado sintetizado para comparação de cenários.

Esse método tem três etapas, a saber:

1. Conversão dos resultados do inventário (indicadores) em percentagem. Ou seja, cada elemento coletado através do questionário é somado a sua respectiva subcategoria e calculada a respectiva percentagem.
2. Atribuição de pontuações a indicadores e subcategoria. Conforme demonstra a Tabela 13 e Tabela 14, as percentagens seguem o sistema de pontuação descrito.

3. Soma das pontuações. Nessa etapa ocorre a soma de cada pontuação das subcategorias onde se obtêm um indicador único. Para a aplicação em casos combinados (Exemplo: Cenário de 60% aterro e 40% de flocos, ocorre previamente a multiplicação do cálculo percentual sobre o cenário puro).

Na Tabela 13 apresenta-se o sistema de pontuação adotado por escala. Ele tem a finalidade de realizar a pontuação de cada indicador observado. Onde se tem dois casos distintos:

- Pontuação diretamente proporcional quanto mais respostas positivas em percentagem maior a pontuação, como é o caso do Salário Justo, Benefício social / segurança social , Envolvimento da comunidade.
- Pontuação inversamente proporcional como é caso dos indicadores para Trabalho infantil, Trabalho forçado, Discriminação. Quanto maior a percentagem de respostas menor será a pontuação obtida.

Tabela 13: O sistema de pontuação proposto.

Subcategorias indicadores	Porcentagem	Pontuação
Trabalho infantil	0–20	4
	21–40	3
	41–60	2
	61–80	1
	81–100	0
Salário Justo	0–20	0
	21–40	1
	41–60	2
	61–80	3
	81–100	4
Trabalho forçado	0–20	4
	21–40	3
	41–60	2
	61–80	1
	81–100	0

Tabela 13: O sistema de pontuação proposto. (Continuação).

Subcategorias indicadores	Porcentagem	Pontuação
Benefício social / segurança social	0–20	0
	21–40	1
	41–60	2
	61–80	3
	81–100	4
Discriminação	0–20	4
	21–40	3
	41–60	2
	61–80	1
	81–100	0
Envolvimento da comunidade	0–20	0
	21–40	1
	41–60	2
	61–80	3
	81–100	4

Fonte: Foolmaun e Ramjeeawon (2013a).

A Tabela 14 expressa a relação entre o sistema de pontuação e o número de empregos criados. Nesta classificação utilizou-se o intervalo de classe. De maneira similar ao da Tabela 13.

Tabela 14: Sistema de pontuação

Número de empregos criados	Pontuações
0–225	1
226–450	2
451–675	3
676–900	4

Fonte: Adaptado de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a).

4.4.4 Interpretação

A fase de interpretação contém os resultados e discussões e conclusões sobre o estudo de caso realizado.

4.4.4.1 Resultados da ACVS

Conforme orientação metodológica de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a), os questionários foram preenchidos no local das entrevistas, perfazendo-se entrevistas com os trabalhadores. Da mesma maneira foram realizadas entrevistas com os respectivos gestores para averiguar a informação fornecida pelos trabalhadores, garantindo confidencialidade das informações de ambas as partes. Observa-se que o questionário utilizado era basicamente igual ao descrito nas Tabelas 17 e 18.

Os dados coletados através dos questionários foram compilados na Tabela 15 que demonstra os resultados já em percentagem separados pelos modos de descartes analisados, a saber: Separação, Aterro e Incineração, mais os cenários 8 e 9 que são 100% separação variando apenas o modo da coleta. Ainda segundo a Tabela 15 destaca-se que os dados do cenário de incineração foram utilizados segundo os dados de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a).

A Tabela 16 apresenta a síntese dos resultados da subcategoria de Saúde e Segurança, onde os resultados são discutidos a seguir. Conscientização sobre questões de saúde e segurança: Todos cenários tiveram um bom desempenho acima dos 80%, exceto o pior nesse aspecto (Aterro) e o cenário de Separação (Cenário 5). Consciência das etapas - Protocolo a seguir em caso de emergência (acidentes): Neste item, os resultados foram diretamente proporcionais aos de item anterior. Porcentagem de acidentes (lesões) na organização: Apenas o cenário de Incineração não teve acidentes, os demais tiveram uma taxa acima de 20% apesar dos níveis diferentes de conscientização sobre as etapas e protocolos de segurança. Isto pode ser atribuído a diferença de complexidade entre as atividades. Uso de equipamento de proteção. Todos cenários apresentaram resultados acima dos 90% para a utilização dos equipamentos de segurança.

Observados os resultados acima, de modo geral o melhor cenário nos quesitos saúde e segurança foi o da Incineração.

Tabela 15: Resumo dos resultados de sete subcategorias para os cinco cenários de eliminação

Categorias de Stakeholder	Indicadores de subcategoria	Percentagem calculada para				
		Separação	Aterro	Incineração	Cenário 8	Cenário 9
Trabalhadores	Trabalho infantil	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Salário justo	67,16%	43,98%	70,00%	74,83%	85,96%
	Trabalho forçado	16,89%	70,01%	0,00%	19,78%	23,96%
	Benefício social / segurança social	93,04%	100,00%	100,00%	93,34%	93,82%
	Discriminação	2,32%	0,00%	0,00%	2,22%	2,06%
Sociedade		51	40		51	51
		Cooperados +	(27	(60	Cooperados +	Cooperados +
		40 (Coleta	funcionários	trabalhadores	40 (Coleta	40 (Coleta
		EMBURD)+	na planta +13	em planta de	EMBURD)+	EMBURD)+
		20 (Coleta	terceiros).	incineração +71	20 (Coleta	20 (Coleta
Comunidade local		SEMA)	+103 (Coleta	para coleta	SEMA)	SEMA)
		341 Indiretos	EMBURD)		341 Indiretos	341 Indiretos)
		452	143	131	452	452
	Envolvimento da comunidade	1,91%	0,00%	19,00%	1,83%	1,70%

Tabela 16: Resultados de saúde e subcategoria de segurança para os cinco cenários de eliminação

Saúde e segurança	Percentual calculado para				
	Separação	Aterro	Incineração	Cenário 8	Cenário 9
Indicador					
Conscientização sobre questões de saúde e segurança	78,03%	67,99%	90,00%	83,15%	90,58%
Consciência das etapas / protocolo a seguir em caso de emergência / acidentes	78,14%	67,99%	100,00%	82,21%	88,15%
Porcentagem de acidentes / lesões na organização	18,56%	26,11%	0,00%	24,18%	27,73%
Uso de equipamento de proteção	91,88%	100,00%	100,00%	92,23%	92,78%

4.4.3.2 Avaliação do impacto social

Depois de coletar os dados nas Tabelas 19 e 20, os mesmos foram tabulados e pontuados na escala de pontuação de 0 – 4 conforme instrução das Tabelas 13 e 14.

A Tabela 17 apresenta a pontuação referente a Tabela 15.

Tabela 17: Pontuação de saúde e subcategoria de segurança para os cinco cenários de eliminação

Saúde e segurança	Pontuações			Cen. 8	Cen. 9
	Separação	Aterro	Incineração		
Indicador					
Conscientização sobre questões de saúde e segurança	3	3	4	4	4
Consciência das etapas / protocolo a seguir em caso de emergência / acidentes	3	3	4	4	4
Porcentagem de acidentes / lesões na organização	3	3	4	3	3
Uso de equipamento de proteção	4	4	4	4	4
Pontuação total	13	13	16	15	15
Média	3,25	3,25	4	3,75	3,75

Já a Tabela 18 apresenta as pontuações para esses mesmos valores incluindo o indicador de saúde e segurança. A avaliação do impacto social é medida pela soma da pontuação de cada cenário de fim de vida, e pontuado em ordem decrescente, ou seja, quem tiver maior soma de pontuação obtém melhor posição.

Tabela 18: Pontuações para os cinco cenários de eliminação

Categorias de <i>Stakeholder</i>	Indicadores de subcategoria	Pontuações				
Trabalhadore s		Separação	Aterr o	Incineraçã o	Cen. 8	Cen. 9
	Trabalho infantil	4	4	4	4	4
	Salário justo	3	2	3	3	4
	Trabalho forçado	4	1	4	4	3
	Saúde e segurança	3,25	3,25	4	3,75	3,75
	Benefício social / segurança social	4	4	4	4	4
	Discriminação	4	4	4	4	4
Sociedade	Contribuição para a economia e Desenvolvimento	4	1	1	4	4
Comunidade local	Envolvimento da comunidade	0	0	0	0	0
Pontuação total		26,25	19,25	24,0	26,75	26,75

4.4.4.3 Interpretação

A Tabela 19 apresenta de forma sumarizada os resultados de cada cenário. Onde se destacam nas primeiras posições os cenários de Separação (Cenário 5, Cenário 8 e Cenário 9). A diferença entre eles está no agente de coleta seletiva.

Tabela 19: Pontuações finais para os cenários de descarte

Cenário	Pontuação	Hierarquia
9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	26,75	1
8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),	26,75	2
5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);	26,25	3
3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;	25,13	4
7) 100% para incineração,	24,00	5
2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;	22,75	6
4) 50% para aterro, 50% para incineração;	21,63	7
1) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de	19,50	8
6) 100% para aterro;	19,25	9

Os indicadores das subcategorias mostraram que não houve casos de trabalho infantil, discriminação social, trabalho forçado no Cenário 5 (Separação) e no Cenário 7 (Incineração). E todos os trabalhadores dos diversos cenários analisados tiveram contemplados benefícios sociais relevantes. Obtendo nesses itens as maiores pontuações.

Com relação ao indicador trabalho forçado, observa-se que 70% dos trabalhadores do Aterro apontam que os trabalhos são peados, enquanto apenas 16,89%, 19,78%, 23,96% dos cenários de Separação, Cenário 8 e Cenário 9 estão descontentes com esse item.

Já com relação ao item salário justo, apenas 43,38% dos funcionários do Aterro estão satisfeitos com seus rendimentos, enquanto há satisfação é maior nos outros cenários: 67,16%, 70,00%, 74,83%, 85,96%, respectivamente dos cenários de Separação, Incineração, Cenário 8 e Cenário 9. Observa-se que os funcionários do Ecopontos são funcionários de fim de carreira incumbidos de trabalhos mais leves, logo tiveram pontuação maior nesses últimos cenários (Cenários 8 e 9). Contudo, vale salientar que os salários foram balizados por acordo coletivo de classe junto aos sindicatos de cada setor. Salientando que para os casos da EMDURB e SEMMA os cargos passam por concurso público, então o funcionário tem os valores previamente listados em edital. Enquanto que nas cooperativas ocorre o rateio dos lucros após o período de apuração mensal.

Já na categoria de Saúde e Segurança os cenários tiveram no geral uma pontuação expressiva, todos pontuaram acima de 3,25 (máximo 4). Porém, pode ser observada algumas diferenças quanto à conscientização sobre questões de saúde e segurança. Pois, 32,01% dos trabalhadores do Aterro não tinham conscientização nem consciência do protocolo de emergência em casos de intercorrências. Já os cenários de Separação tiveram um melhor desempenho, 78,03% tem conscientização sobre saúde e segurança, tendo 78,14% entendimento do protocolo de intercorrências. Nesse item os Cenários 8 e 9 e Incineração tiveram respectivamente 88,40%, 93,21% e 90% de conscientização sobre questões de saúde e segurança, sabendo seguir o protocolo em casos de emergência com a seguinte percentagem 84,46% (Cenário 8), 89,28% (Cenário 9), 100% Aterro.

A percentagem de acidente está equilibrada entre os diversos cenários, sendo de maior incidência sobre o Cenário 9 (27,73%), seguido de 26,11% do Aterro, 24,18% Cenário 8, 21,79% Separação (cenário 5), 0% Incineração.

Com relação à utilização do equipamento de proteção individual, todos os cenários tiveram a pontuação máxima 4, (todos acima de 91%).

Destaca-se no quesito segurança o cenário 7 (Incineração) teve menor incidência de acidentes, pois teve maior investimento em pessoal especializado (existe a presença do Técnico de Segurança para apoiar o desenvolvimento da área). Também na planta do Aterro (Cenário 6) os profissionais especializados em segurança do trabalho são contemplados.

4.4.4.4 Discussão

Os resultados obtidos através da metodologia empregada foram interpretados no item 5.4.3.3 e notou-se que os melhores impactos sociais acontecem quando 75% das garrafas PET são coletadas via Ecoponto e 25% via coleta seletiva (Cenário 9).

O cenário 9 obteve melhor percentagem de desempenho das respostas se comparado com o Cenário 8, isto pode ser visto na Tabela 15 e 20. Tendo melhor desempenho percentual nas categorias de Salário justo, Benefício social/segurança social, Discriminação e Saúde e Segurança. Empatando nos itens trabalho infantil e Número de empregos criados. Perdendo do cenário 8 apenas nos itens trabalho forçado e Envolvimento da comunidade.

Quanto menores os intervalos de classe das Tabelas 17 e 18, melhor será a divisão de ranking, conforme pode se notar no exemplo acima.

Depois dos cenários de Separação veio Incineração e Aterro com as respectivas pontuações 24,0 e 19,25. Conforme demonstra a Tabela 10 os resultados de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) foram semelhantes.

Tabela 20: Comparação dos resultados

Foolmaun e Ramjeeawon (2013a)	Pont.	Resultados deste trabalho	Pont.
100% Flake	27,0	9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	26,75
		8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),	26,75
		5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);	26,25
100% Incineração	24,0	100% Incineração	24,00
100% Aterro	20,5	100% Aterro	19,25

Conforme se observa na Tabela 20, em ambos os casos no Bauru/Brasil e na República de Maurício prevaleceu os cenários de reciclagem (Flakes na República de Maurício e Separação no Brasil), seguido de Incineração e Aterro.

Os impactos sociais no número de emprego para área de reciclagem (Separação Brasil e Flakes/República de Maurício) foi expressivo frente aos outros resultados, enquanto que o cenário de Incineração ficou em segundo lugar, tendo o cenário de Aterro menor desempenho.

Nesta tese foi incluída uma nova variável que foram as diferentes maneiras para realizar a coleta seletiva. O trabalho de Foolmaun e Ramjeeawon (2013a) não contemplava essa análise de sensibilidade. Esse tipo de medida é importante para verificar localmente nos cenários de destinação final o que pode ser melhorado frente aos desempenhos sociais. E neste trabalho foi possível verificar que a diminuição da coleta porta a porta e consequente incremento da coleta via Ecoponto foi benéfica para os impactos sociais. Colocando esses cenários novos nas primeiras posições.

4.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO

Este trabalho evidenciou três cenários de descarte final (Separação - Cenário 5, Aterro - Cenário 6, Incineração - Cenário 7). Ainda dentro do cenário de Separação foram estabelecidos mais dois cenários alternativos: Cenários 8 e 9, oriundos da alteração das percentagens de participação na coleta seletiva entre EMBURD, ASCAM e SEMMA). Os Cenários 2, Cenário 3, Cenário 4 são composições em percentagem dos cenários de destinação final (Separação - Cenário 5, Aterro - Cenário 6, Incineração - Cenário 7). O cenário 1 representa o cenário base a respeito da destinação atual dos resíduos de garrafa PET pós consumo no contexto brasileiro da cidade de Bauru-SP. Totalizando assim 9 alternativas possíveis.

O estudo demonstrou que a maneira como se coleta os resíduos recicláveis influencia diretamente os impactos sociais sobre o sistema. Ainda foi possível estabelecer através da metodologia utilizada um ranking dos melhores cenários quanto aos impactos sociais positivos, a saber;

- 1) Cenário 9 - 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).
- 2) Cenário 8 - 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),

- 3) Cenário 5 - 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);
- 4) Cenário 3 - 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;
- 5) Cenário 7 - 100% para incineração,
- 6) Cenário 2 - 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;
- 7) Cenário 4 - 50% para aterro, 50% para incineração;
- 8) Cenário 1 - cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,
- 9) Cenário 6 - 100% para Aterro;

Sugere-se para próximos trabalhos empregar outras análises de sensibilidade nos próximos trabalhos a variação do modo de coleta para os cenários de coleta convencional atrelados ao Aterro e Incineração. Também seria de grande valia aplicar essa metodologias para outros tipos de resíduos sólidos urbanos.

No próximo capítulo será apresentado o *framework* para a integração dos resultados da ACV ambiental (Capítulo 4) e ACV social (Capítulo 5).

5. INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL DAS DESTINAÇÕES DO CICLO DE VIDA PARA GARRAFA PET

5.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável é um caminho de proteção para ganhos importantes desejados, onde as pessoas e o planeta figuram o centro do sistema. O seu êxito depende de mudanças robustas para promover igualdade, inclusão e resiliência (ARIVUMANI, 2017). O termo Desenvolvimento Sustentável não é novo, já se passaram três décadas desde sua fundamentação no relatório da Comissão Brundtland. Apesar de ser um conceito consolidado a níveis mundiais, trazê-lo à prática ainda é um desafio (WALL, 2018).

A chave para obter a avaliação da sustentabilidade de produtos e serviços está na mensuração dos seus impactos. Uma ferramenta consolidada para aferir a sustentabilidade ambiental é a integração da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) (ZIMDARS; HAAS; PFISTER, 2018).

A integração entre os pilares da sustentabilidade é de grande importância para uma análise global do sistema, apoio à tomada de decisão. Porém, paralelamente à crescente consciência de sustentabilidade surgiram conceitos importantes como o da Responsabilidade Estendida pelo Produto que incentiva produtores a projetar produtos ecológicos e gerenciar seus resíduos no pós-consumo.

No Brasil, destaca-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que cria regras e objetivos para o gerenciamento de resíduos sólidos (BRASIL, 2010). Porém, o resíduo de Garrafas PET tem limitações adicionais quanto a sua reutilização (Campo alimentício, apenas 25% retorna a sua cadeia de origem, o restante migra para os setores: Têxtil (25,7%), Resinas Insaturadas e Alquídicas (28,6%), Laminados e Folhas (8,6), Alças (5,7%), Outros (5,7%) (ABI PET, 2016a).

Poucas pesquisas têm discutido sobre o gerenciamento de resíduos de garrafa PET nos quesitos ambientais e sociais, logo este estudo visa estabelecer um *framework* para integração dos impactos ambientais e sociais. E encontrar uma melhor rota de sustentabilidade socioambiental no estudo de caso proposta para cidade de Bauru, onde foram propostos nove cenários, a saber: (1) cenário atual (base) (96,4% do fluxo de referência é enviado para aterro, 3,6% é enviado para cooperativas de triagem, conforme apresentado na seção 3.2.; (2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para

aterro; (3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração; (4) 50% para aterro, 50% para incineração; (5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleta atual); (6) 100% para aterro; (7) 100% para incineração, (8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva), (9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados nos Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).

Os objetivos do estudo foram:

- Geral - Estabelecer uma estrutura base para aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida Sustentável através da aplicação do AHP modificado.
- Específico - Aplicar a estrutura base de integração das ACV's no estudo de caso da cidade de Bauru e determinar a melhor rota de destinação final quanto aos quesitos socioambientais das garrafas PET, e, assim apoiar a administração pública da cidade de Bauru quanto ao estabelecimento de políticas pertinentes para o descarte desse resíduo.

5.2 REVISÃO TEÓRICA

A busca pela sustentabilidade tem se consolidado sobre a base do “*Triple Bottom*”. Onde a base construída pelo cuidado com o meio ambiente recebe dois novos atores: a preocupação com o aspecto social e econômico.

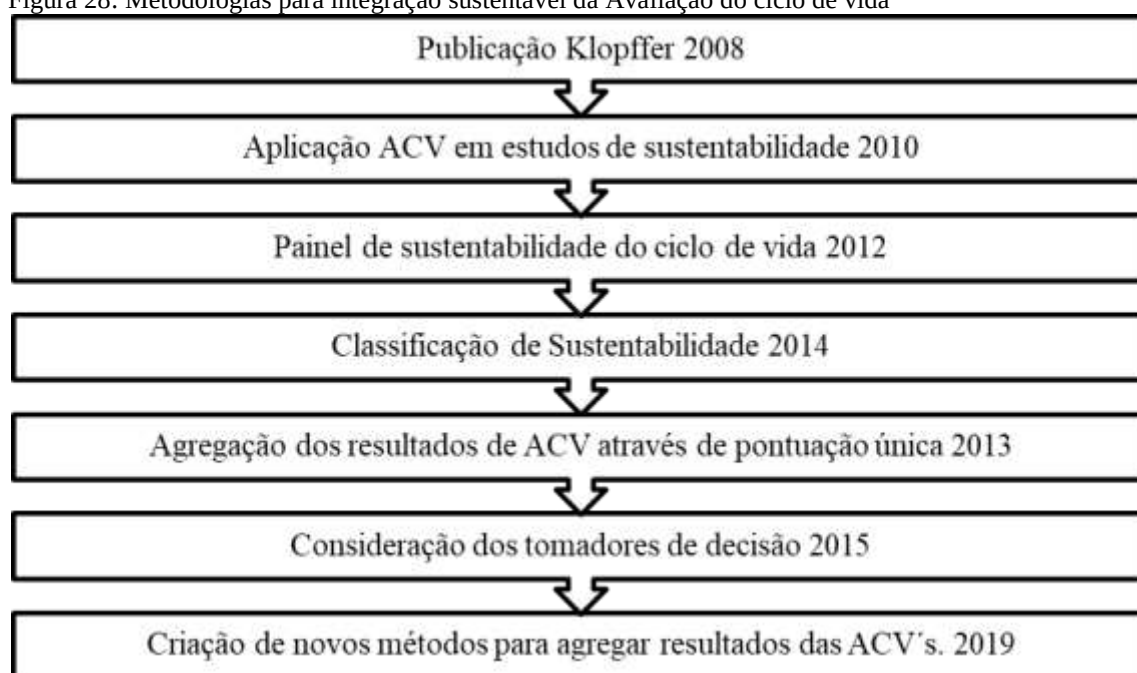
Dentro dessa perspectiva surgiram trabalhos de Avaliação do ciclo de vida procurando integrar esses pilares de sustentabilidade. Dois estudos foram realizados nos últimos anos sobre a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida utilizando a ferramenta revisão sistemática da literatura:

- Costa; Quinteiro e Dias (2019) publicado no *Science Of The Total Environment* com o título “*A systematic review of life cycle sustainability assessment: current state, methodological challenges, and implementation issues*”. Palavras-chave utilizadas: "Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida", "Análise da Sustentabilidade do Ciclo de Vida" ou sua sigla, LCSA. E Avaliação do Ciclo de Vida" ou LCA, "Avaliação do Ciclo de Vida Social" ou s-LCA ou SLCA e "*Life Cycle Costing*" ou LCC. E o período de análise foi até dezembro de 2018.
- Visentin et al. (2020) foi publicado no *Journal of cleaner production* com o título: “*Life cycle sustainability assessment: a systematic literature review*

through the application perspective, indicators, and methodologies”.
 Palavras-chave utilizadas: "Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida"
 OU "Análise da Sustentabilidade do Ciclo de Vida" OU "Avaliação
 Sustentável do Ciclo de Vida" OU "Análise Sustentável do Ciclo de Vida"
 OU "LCSA". O período de análise foi de 2008 a 2019.

O trabalho de (VISENTIN et al., 2020) aponta as principais metodologias criadas para integração dos eixos da sustentabilidade: Meio ambiente, Econômico e Social, conforme mostra a Figura 28.

Figura 28: Metodologias para integração sustentável da Avaliação do ciclo de vida



Fonte: Adaptado de Visentin et al. (2020).

Neste trabalho Visentin, Trentin, Braun e Thomé (2020) elucidam a utilização de diversas ferramentas para trabalhar a integração dos pilares de sustentabilidade:

- Metodologia de análise de decisão multicritério (MDCA - *Multi-criteria decision analysis*).
- Teoria do Valor Multiatribuída, (MAVT - *Multiattribute Value Theory*)
- *Ranking* de sustentabilidade
- Painel de Sustentabilidade do Ciclo de Vida
- Desempenho de sustentabilidade do ciclo de vida
- Método *Fuzzy*

- Modelo FELICITA
- Diagrama de coordenadas tridimensional
- Intervalo de tomada de decisão múltipla
- AHP – Análise hierárquica do processo; Intervalo AHP
- Técnica de Preferência de Pedido por Similaridade com Solução Ideal, (TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*).
- Método de organização de classificação de preferência para avaliação de enriquecimento, (PROMITHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation*).

Esse autor destaca que nos trabalhos analisados predomina-se a utilização de metodologias multicritérios, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29: Estrutura de avaliação do ciclo de vida e principais metodologias de análise de sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Visentin et al. (2020).

Apenas 51% dos trabalhos realizam a integração das avaliações do Ciclo de Vida, apesar deste movimento ter ganhado força à 12 anos com a publicação de Klopffer com o trabalho intitulado “Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida dos produtos” na revista “*International Journal of Life Cycle Assessment*” no ano de 2008, Figura 28.

A pesquisa de Costa; Quinteiro e Dias, (2019) pontuou a integração sustentável entre os pilares de sustentabilidade: Ambiental, Econômico e Social em duas vertentes de integração:

- 1) A primeira integrando os pilares de sustentabilidade após sua aplicação.

- 2) A segunda vertente fazendo um inventário único e por fim realizando a avaliação conjunto dos pilares.
- 3) A terceira análise incluiu a integração dos pilares clássicos junto a outras ferramentas como ecoeficiência e ACVS, ACV e Análise socioeconômica, etc.

Os resultados do trabalho de Costa; Quinteiro e Dias, (2019) evidenciam que existe uma variação nas ferramentas utilizadas em cada método empregado, porém existe um predomínio de algumas ferramentas de acordo com o caminho a ser escolhido, conforme foi pontuado na última coluna da tabela. Os resultados desses trabalhos apontam que:

- 1) A primeira abordagem análise separada e agregação superior, mostra um predomínio da utilização do método AHP e MAVT
- 2) Já a segunda abordagem, avaliação conjunta dos aspectos de sustentabilidade o predomínio da associação com o método TOPSIS.
- 3) A terceira abordagem do trabalho de por Costa; Quinteiro e Dias, (2019) devido a poucos trabalhos realizados não tem uma metodologia mais recorrente.

Observando os trabalhos inseridos nos jornais de alto impacto esse trabalho com foco nos resíduos de garrafa PET optou em utilizar a abordagem (1) para poder comparar os resultados com pesquisas similares. Desta maneira seguindo a recomendação de por Costa e Quinteiro e Dias (2019) e Visentin et al., (2020), utilizará o método AHP para integração da ACV-Ambiental e ACV-Social realizadas anteriormente. A metodologia empregada será detalhada na próxima seção .

A metodologia AHP utiliza um grupo de especialistas para realizar o julgamento de valor entre os critérios em pares. E através do agrupamento matricial das respostas obtêm-se um vetor de prioridade (Peso entre os critérios). Porém, um determinado problema pode ser representado por diferentes hierarquias, desde a escolha dos critérios e seu agrupamento como nas percepções pessoais (OPHER; FRIEDLER; SHAPIRA, 2019).

Os principais trabalhos de normalização utilizados foram Aziz; Chevaki dagarn; Danteravanich, (2016), Nzila et al., (2012) e Wulf et al., (2017). Além desses os outros trabalhos dispostos na revisão sistemática de Costa e Quinteiro e Dias (2019); Visentin et al., (2020), também se utilizam desta ferramenta para agregar os pilares de sustentabilidade.

Porém, Wulf et al., (2017) demonstraram que o método de normalização aplicado tem maior influência nos resultados gerais do que o método de agregação ou fatores de ponderação.

Para não depender do julgamento de valor de especialistas, e manter uma consistência esse trabalho seguirá com a utilização de normalização, agregação aditiva e análise de sensibilidade para avaliar a ponderação.

5.3 *FRAMEWORK* PARA INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL DAS DESTINAÇÕES DO CICLO DE VIDA GARRAFA PET

A metodologia utilizada neste trabalho foi utilizar a análise multicritério recomendada por Akhtar et al. (2015), De Luca et al. (2018), Hossaini *et al*, (2015), Opher; Friedler; Shapira, (2019) e (Ekener et al., 2018).

Este trabalho estabelece uma estrutura para a integração da avaliação do ciclo sustentável de vida utilizando como base avaliações anteriores dos pilares ambiental e social, conforme proposto por Kloeppfer (2008).

$$ACSV = AVCA + ACVE + ACVS \quad (1)$$

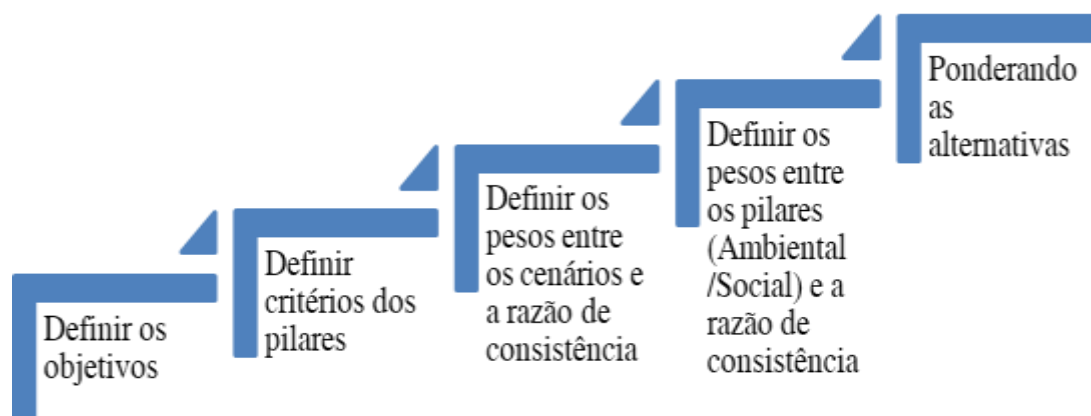
Onde:

- ASCV: Avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida
- ACVA: Avaliação do Ciclo de Vida Ambiental
- ACCE: Avaliação do Ciclo e Vida Econômico,
- ACVS: Avaliação do Ciclo de Vida Social
- Obs.: Neste trabalho foram utilizados os pilares social e ambiental.

Para a integração entre os pilares é importante que as avaliações do ciclo de vida tenham as mesmas unidades de comparação: fronteiras do sistema, unidade funcional e cenários de comparação, etc. Seguindo a estrutura de ACV-Ambiental colocada no capítulo 4 e ACV-Social estabelecida no capítulo 5.

Para a integração dos pilares de sustentabilidade será utilizada a metodologia modificada do método AHP (Análise Hierárquica do Processo). A Figura 30 mostra as etapas para a integração entre as avaliações do ciclo de vida.

Figura 30: Etapas para integração das ACV's pelo método AHP.



Observa-se que a Figura 30 apresenta o padrão das etapas do método AHP como estão presentes em diversos trabalhos: De Luca et al. (2018), Hossaini et al. (2015), Opher; Friedler; Shapira (2019) e Foolmaun e Ramjeawon (2013b). Porém, na etapa 4 (Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência), ocorre a modificação desse método, onde os pesos são estabelecidos pelos resultados dos impactos socioambientais através do cálculo do Vetor de Eigen, e não mais por painéis de especialistas.

Essa modificação traz redução da subjetividade na tomada de decisão, lacuna apontada por Opher; Friedler; Shapira, (2019), e prioriza a objetividade na ponderação entre os pilares (Ambiental e Social). Possibilitando assim uma mensuração de resultados mais robustos na integração, auxiliando desta forma a tomada de decisão.

Com relação as etapas da Figura 30 descreve-se o passo a passo para a integração das avaliações do ciclo de vida (Ambiental e Social) pela metodologia modificada do método AHP:

1) Definir Objetivos. Neste item aponta-se que o sistema tem como objetivo encontrar a alternativa mais sustentável quanto aos pilares escolhidos dentro da base relacional determinada.

2) Definir critérios dos pilares. Escrever os pilares escolhidos. E a metodologia de execução das avaliações do ciclo de vida individuais. Para a ACV-Ambiental (Capítulo 4) utiliza-se as normas da família ISO 14040:

NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura, e

NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações.

E na ACV-Social (Capítulo 5) utiliza-se as etapas da NBR ISO 14040 seguindo as diretrizes da SETAC/UNEP:

Diretrizes para avaliação do ciclo de vida social de produtos (UNEP /SETAC, 2009).

As Fichas Metodológicas para Subcategorias na Avaliação do Ciclo de Vida Social (UNEP / SETAC, 2013).

3) Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência. Nessa etapa os resultados das avaliações do ciclo de vida deverão ser normalizados de 0 à 1 para conseguinte comparação. Conforme os pesquisadores Aziz; Chevakidagarn; Danteravanich (2016) e Wulf et al., (2017) recomenda-se a utilização da normalização externa com base em dados anuais se os mesmos estiverem disponíveis, caso contrário utiliza-se a normalização interna dos cenários analisados. Observar a natureza dos dados para otimizar a normalização. Este procedimento tem como base a equação 2, onde o valor máximo de referência (SOUSA, 2008).

$$N_{ij} = \frac{S_{ij}}{S^*j} \quad (2)$$

Onde:

N_{ij} é o valor normalizado do critério i para a alternativa j ;

S_{ij} é o valor do critério i para a alternativa j , antes da normalização;

S^*j é o valor máximo do critério i selecionado entre os valores de S_{ij} .

$$N_{ij} = \frac{S-j}{S_{ij}} \quad (3)$$

Onde:

$S-j$ é o valor mínimo do critério i selecionado entre os valores de S_{ij} .

Caso os resultados tenham dados com comportamentos distintos podem ser utilizadas outras normalizações como Linear Simples, Vetorial, Padrão, Sigmoidal, Decimal (SOUSA, 2008). Ou ainda recomendado por Wulf et al., (2017) por Diferença (Linear Simples), Mínimo, Classificação (*Ranking*).

Após normalizados os dados de cada sistema (Ambiental e Social), devem ser agrupados em uma matriz de prioridades na Tabela 21.

Essa etapa difere do modelo AHP tradicional que utiliza-se de especialistas para apontar os pesos entre os cenários e entre as áreas (Ambiental e Social). Logo, nesta etapa os valores do resultado da matriz normalizada (Tabela 21) das avaliações dos ciclo de vida são agregadas em uma matriz de preferência comparando os cenários (Tabela 22).

Tabela 21: ACV-Social normalizada de 0 à 1

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Normalização	N1	N2	N3

Os valores dos cenários são comparados aos pares gerando a Tabela 22. Para calcular a tabela 22 utiliza-se a fórmula descrita na própria tabela.

Tabela 22: Matriz de preferência entre os cenários ACV-Social

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Cenário 1	N1/N1	N1/N2	N1/N3
Cenário 2	N2/N1	N2/N2	N2/N3
Cenário 3	N3/N1	N3/N2	N3/N3

Estabelece-se a matriz A oriunda da Tabela 22. Onde calcula-se as prioridades pelo ‘Eigen Vector’ como elencado no trabalho de (FOOLMAUN; RAMJEAWON, 2013b).

$$A = \begin{pmatrix} N1/N1 & N1/N2 & N1/N3 \\ N2/N1 & N2/N2 & N2/N3 \\ N3/N1 & N3/N2 & N3/N3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Realiza-se a multiplicação da matriz A por ela mesma gerando a matriz A^2

$$\begin{array}{ccc}
A^2 & \text{Soma} & \text{Peso (W1)} \\
\left(\begin{array}{ccc} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{array} \right) & \begin{array}{l} S1 = A_{11} + A_{12} + A_{13} \\ S2 = A_{21} + A_{22} + A_{23} \\ S3 = A_{31} + A_{32} + A_{33} \end{array} & \left(\begin{array}{c} S1/ST \\ S2/ST \\ S3/ST \end{array} \right) \\
\text{Total} & ST = S1 + S2 + S3 &
\end{array} \quad (5)$$

Para verificação da razão de consistência foi utilizado novamente o vetor de Eigen. Mais uma vez, elevando ao quadrado a matriz A^2 o produto acima das duas matrizes, o novo peso (W2) é

$$\begin{array}{ccc}
B = [A^2]^2 & \text{Soma} & \text{Peso (W2)} \\
\left(\begin{array}{ccc} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{array} \right) & \begin{array}{l} R1 = B_{11} + B_{12} + B_{13} \\ R2 = B_{21} + B_{22} + B_{23} \\ R3 = B_{31} + B_{32} + B_{33} \end{array} & \left(\begin{array}{c} R1/RT \\ R2/RT \\ R3/RT \end{array} \right) \\
\text{Total} & RT = R1 + R2 + R3 &
\end{array} \quad (6)$$

Finalizando o cálculo da consistência pela diferença entre os vetores $W1 - W2$. O valor tem que ser próximo de zero para ser válido a ponderação.

$$\left(\begin{array}{c} W1 \\ S1/ST \\ S2/ST \\ S3/ST \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} W2 \\ R1/RT \\ R2/RT \\ R3/RT \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Diferença} \\ S1/ST - R1/RT \\ S2/ST - R2/RT \\ S3/ST - R3/RT \end{array} \right)$$

4) Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência. Aplica-se o mesmo processo da etapa 3 só que para a normalização entre os pilares. Utilizando-se dos pesos de W2 definidos na etapa anterior para os pilares Ambiental e Social, realiza-se a normalização para cada pilar, esses valores são inseridos na Tabela 21. E por conseguinte os pilares são comparados pelo cálculo da Tabela 22 que promove a base de cálculo para gerar os pesos entre as áreas: Ambiental e Social.

5) Ponderando as alternativas. Para agregar os pesos dos cenários aos pesos dos pilares ambiental e social é realizada a multiplicação entre eles. Cada cenário é multiplicado pelo peso Ambiental e Social e agregado através da soma desses valores.

5.4 APLICAÇÃO DO *FRAMEWORK* DA INTEGRAÇÃO ACV AMBIENTAL E SOCIAL NA CIDADE DE BAURU

5.4.1 Definir objetivos

5.4.1.1 Objetivo e escopo

Este trabalho tem como objetivo comparar a sustentabilidade de nove cenários de descarte de resíduos de garrafa PET utilizando os pilares Social e Ambiental. As avaliações do ciclo de vida foram conduzidas separadamente e depois agregadas em um indicador único de sustentabilidade. A unidade funcional estabelecida foi 1 tonelada (t) de resíduos de PET. Onde o total de resíduos de PET coletados na cidade de Bauru em 2019 foi utilizado como referência para medir os percentuais da vazão de referência por 1 tonelada.

5.4.1.2 Fronteiras do sistema

O limite do sistema inclui a coleta e transporte de resíduos de PET, sua reciclagem ou descarte e substituição de granulado de PET de base fóssil (pela esterificação de etilenoglicol e processo de ácido tereftálico), quando aplicável. Os limites do sistema são representados na Figura 15 em seu cenário base (Cenário 1).

O campo de aplicação deste trabalho foi a cidade de Bauru, onde se obteve um montante de 96.274 toneladas de material reciclado no ano de 2019, os quais foram mensurados por entidades atreladas à prefeitura municipal (MARTIN et al., 2021).

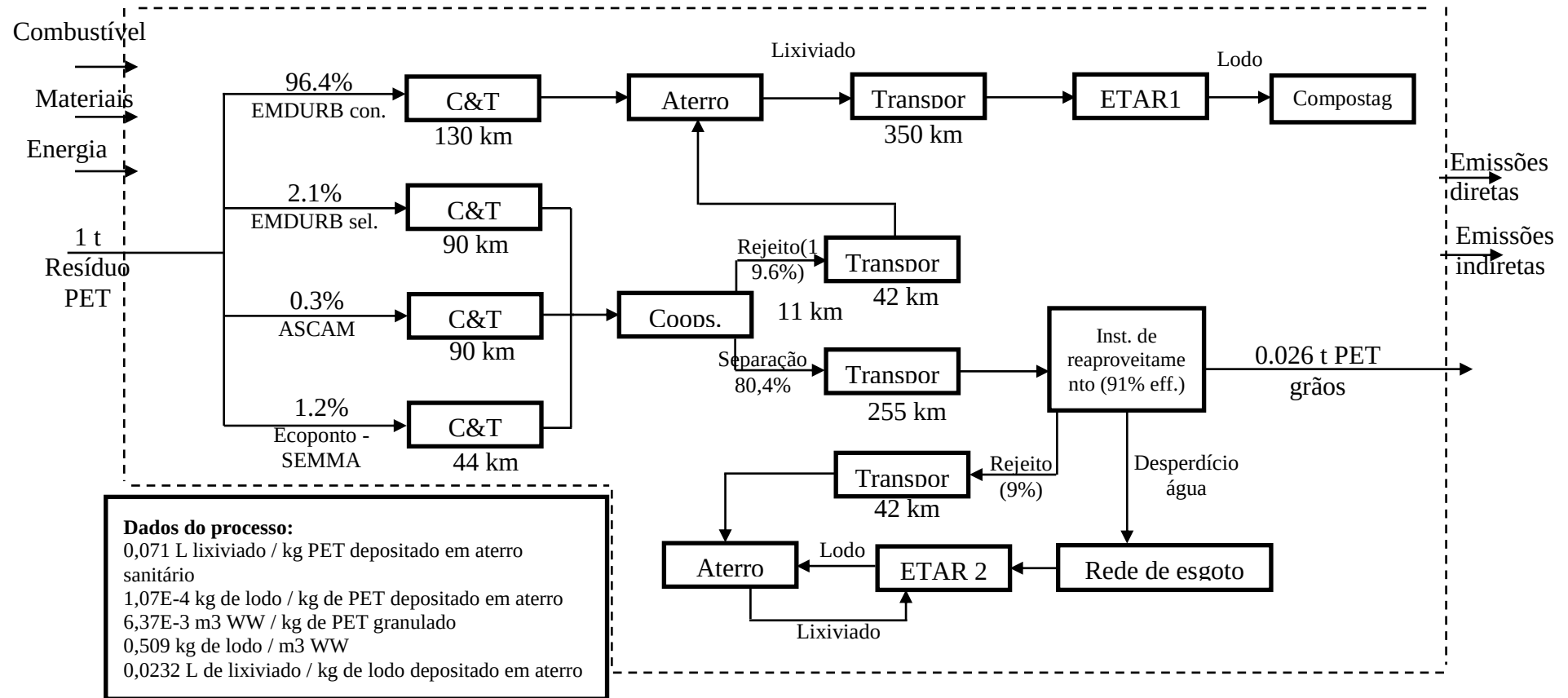
O trabalho de coleta seletiva da cidade está sobre a supervisão da SEMMA (Secretaria do Meio Ambiente), onde tem a administração por modalidade de resíduo a coletado conforme descrito a seguir: (1) Coleta Convencional realizada pela EMDURB (Empresa de desenvolvimento urbano e rural da cidade) é realizada de casa em casa (Porta a Porta). Observa-se que nesse tipo de coleta existe maior percentagem de material orgânico, contudo constatou-se a existência de material reciclado durante a

visita ao aterro . (2) Coleta Seletiva de materiais da cidade também é executada pela EMDURB, onde a coleta é realizada de porta a porta. (3) A ASCAM também realiza a coleta seletiva de materiais recicláveis na modalidade porta a porta. (7) Coleta Seletiva de materiais recicláveis em Ecopontos. Essa modalidade de coleta conta com o livre arbítrio dos moradores da cidade, onde os mesmos depositam de maneira voluntária sem remuneração os resíduos recicláveis. Existem 8 pontos distribuídos pela cidade.

Os resíduos recicláveis são conduzidos às cooperativas de reciclagem (Cootramat, Cooperbau e Coopeco) para triagem e destinação dos materiais. O resíduo final de triagem é conduzido para o aterro. O material colhido na coleta convencional é direcionado ao aterro da cidade de Piratininga.

Este trabalho contou com a inserção de um cenário adicional (Incineração) para finalidades de comparação, utilizou-se dos dados apresentados por Foolmaun; Ramjeawon (2013b).

Figura 15. Limite do sistema para o cenário base (S1).



Onde se tem 9 cenários de disposição final a saber:

- 10) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,
- 11) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;
- 12) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;
- 13) 50% para aterro, 50% para incineração;
- 14) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);
- 15) 100% para aterro;
- 16) 100% para incineração,
- 17) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),
- 18) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).

5.4.2 Definir critérios dos pilares

Os pilares utilizados foram o Ambiental e Social. Onde para ACV Ambiental utilizou-se das normas da família ISO 14040 e para ACV-Social utilizou-se das etapas da diretrizes da ISO 14040 e também das diretrizes da SETAC/UNEP (2009, 2013).

5.4.3 Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência

Os resultados das ACV ambiental e social foram utilizados para estabelecer os pesos entre os cenários e determinar a razão de consistência.

5.4.3.1 Resultados da ACV – Ambiental

Os resultados da avaliação do ciclo ambiental foram expressos na Tabela 23 abaixo. Onde os valores dos resultados da ACV- Ambiental foram normalizados numa escala de 0 a 1, onde um valor mais alto indica um impacto positivo maior.

Para determinar a matriz de preferência entre os cenários não foi utilizado o painel de especialistas conforme o utilizado habitualmente pelo método e criticado pela literatura pela parcialidade nos julgamentos e influência sobre o resultado final na análise.

Tabela 23: Pontuações normalizadas para critérios ambientais

Categoria de impacto	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Mudança climática	<i>kg CO2 eq</i>	2,27 E-02	4,63 E-01	2,44 E-01	5,25 E-01	9,98 E-01	4,96E -02	1,00E +00	9,99E -01	1,00E +00
Destruição do ozônio	<i>kg CFC-11 eq</i>	8,37 E-01	3,50 E-01	3,98 E-01	8,53 E-01	9,75 E-01	1,00E +00	7,06E -01	9,85E -01	1,00E +00
Acidificação terrestre	<i>kg SO2 eq</i>	9,81 E-03	4,85 E-01	4,61 E-01	7,00 E-01	9,97 E-01	4,00E -01	1,00E +00	9,98E -01	1,00E +00
Eutrofização de água doce	<i>kg P eq</i>	2,98 E-02	4,96 E-01	4,98 E-01	8,64 E-01	9,99 E-01	1,00E +00	7,28E -01	1,00E +00	1,00E +00
Toxicidade humana	<i>kg 1,4-DB eq</i>	3,89 E-01	2,77 E-01	6,10 E-02	7,20 E-01	9,98 E-01	4,40E -01	1,00E +00	9,99E -01	1,00E +00
Ecotoxicidade terrestre	<i>kg 1,4-DB eq</i>	1,99 E-01	3,28 E-01	2,31 E-01	6,16 E-01	9,91 E-01	2,32E -01	1,00E +00	9,95E -01	1,00E +00
Ecotoxicidade de água doce	<i>kg 1,4-DB eq</i>	6,28 E-01	3,03 E-01	5,10 E-01	8,26 E-01	9,96 E-01	6,53E -01	1,00E +00	9,97E -01	1,00E +00
Normalização [0-1]		0,302	0,386	0,343	0,729	0,994	0,539	0,919	0,996	1,000

Para dirimir essa problemática foi utilizado os resultados normalizados na ACV para ser utilizado de base na comparação entre os cenários. Onde a pontuação máxima foi utilizada para balizar os demais cenários. Onde um valor maior que 1 representa que o cenário é melhor que o outro cenário. A Tabela 24 mostra esses resultados.

Tabela 24: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
S1	1,00	0,78	0,88	0,41	0,30	0,56	0,33	0,30	0,30
S2	1,28	1,00	1,12	0,53	0,39	0,72	0,42	0,39	0,39
S3	1,14	0,89	1,00	0,47	0,35	0,64	0,37	0,34	0,34
S4	2,41	1,89	2,12	1,00	0,73	1,35	0,79	0,73	0,73
S5	3,29	2,57	2,89	1,36	1,00	1,84	1,08	1,00	0,99
S6	1,79	1,40	1,57	0,74	0,54	1,00	0,59	0,54	0,54
S7	3,04	2,38	2,68	1,26	0,93	1,70	1,00	0,92	0,92
S8	3,30	2,58	2,90	1,37	1,00	1,85	1,08	1,00	1,00
S9	3,31	2,59	2,91	1,37	1,01	1,85	1,09	1,00	1,00

O valor destacado em grifo mostra que o cenário 9 é 3,31 mais importante que o cenário 1. Onde o valor se dá pela divisão do desempenho normalizado do cenário 9 pelo valor do cenário 1.

Ainda na Tabela 24 pode se observar que o cenário de maior importância é o 9, pois tem todos os valores maiores ou iguais a 1. Seguido pelo cenário 8 que tem valor comparativo ligeiramente menor (0,01 para o comparativo nos cenários: 1, 2, 3 e 7). Mostrando assim que esses cenários que utilizaram Ecoponto se sobressaíram frente aos demais no quesito de impactos ambientais. E demonstrando que o cenário 1 teve todos seus resultados abaixo do valor 1, apontando que esse é o pior cenário quanto ao pilar ambiental.

Aplicando o teste de consistência de peso método Eigen Vector obteve-se a Tabela 25, onde se pode observar a síntese dessas comparações em um único número (cálculo de peso), gerando a hierarquização entre os cenários. Onde destacaram-se os cenários de separação nas primeiras posições (Cenário9, Cenário 8 e Cenário 5).

Tabela 25: Prioridades entre os cenários – Ambiental

Hierarquia	Cenário	Peso
a		
1	9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	0,16
2	8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),	0,16
3	5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);	0,16
4	3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;	0,15
5	7) 100% para incineração,	0,12
6	2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;	0,09
7	4) 50% para aterro, 50% para incineração;	0,06
8	1) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,	0,06
9	6) 100% para aterro;	0,05

5.4.3.2 Resultados da ACV –SOCIAL

Os resultados da avaliação do ciclo social foram expressos na Tabela 26. Onde os valores dos resultados da ACV-Ambiental foram normalizados numa escala de 0 a 1 , onde um valor mais alto indica um impacto positivo maior.

Tabela 26: Pontuações normalizadas para critérios sociais

Cenário	Pontuação	Normalização [escala de 0-1] Referência maior pontuação
9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	26,75	1,00
8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),	26,75	1,00
5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);	26,25	0,98
3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;	25,13	0,94
7) 100% para incineração,	24,00	0,90
2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;	22,75	0,85
4) 50% para aterro, 50% para incineração;	21,63	0,81
1) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,	19,50	0,73
6) 100% para aterro;	19,25	0,72

A atribuição de preferência entre os cenários foi determinada de maneira análoga à apresentada na Avaliação do Ciclo de Vida - Ambiental. E os respectivos resultados são expressos da Tabela 27

Tabela 27: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final – SOCIAL

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
S1	1,00	0,86	0,78	0,90	0,74	1,01	0,81	0,73	0,73
S2	1,17	1,00	0,91	1,05	0,87	1,18	0,95	0,85	0,85
S3	1,29	1,10	1,00	1,16	0,96	1,31	1,05	0,94	0,94
S4	1,11	0,95	0,86	1,00	0,82	1,12	0,90	0,81	0,81
S5	1,35	1,15	1,04	1,21	1,00	1,36	1,09	0,98	0,98
S6	0,99	0,85	0,77	0,89	0,73	1,00	0,80	0,72	0,72
S7	1,23	1,05	0,96	1,11	0,91	1,25	1,00	0,90	0,90
S8	1,37	1,18	1,06	1,24	1,02	1,39	1,11	1,00	1,00
S9	1,37	1,18	1,06	1,24	1,02	1,39	1,11	1,00	1,00

Observando a Tabela 27 pode se observar que os cenários de maior importância são os cenários 8 e 9, pois tem todos os valores maiores ou iguais a 1. Revelando que esses cenários que utilizaram Ecoponto se sobressaíram frente aos demais no quesito de impactos sociais. E demonstrando que o cenário 1 teve todos seus resultados abaixo do valor 1, apontando que esse é o pior cenário quanto ao pilar social (este é o cenário atual da cidade de Bauru).

A Tabela 27 foi convertida na matriz de prioridades entre os cenários de acordo com o método pesos entre método Eigen Vector que resultou na Tabela 28. Observando a tabela 28 se observa a sumarização dessas comparações através do cálculo de peso no quesito social, promovendo assim a hierarquização entre os cenários. Onde destacaram-se os cenários de separação nas primeiras posições (Cenário 9, Cenário 8 e Cenário 5).

Tabela 28: Prioridades entre os cenários – SOCIAL

Hierarquia	Cenário	Peso
1	9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	0,13
2	8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva).	0,13
3	5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual).	0,12
4	3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração.	0,12
5	7) 100% para incineração.	0,11
6	2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro.	0,11
7	4) 50% para aterro, 50% para incineração.	0,10
8	1) Atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% enviada para cooperativas de triagem).	0,09
9	6) 100% para aterro.	0,09

5.4.4 Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência

Os resultados das ACV- SOCIAL e ACV-AMBIENTAL foram utilizados para definir os pesos de cada ACV e sua razão de consistência

Os pesos entre os pilares utilizaram a Tabela 29 abaixo que foi formalizada e pelo método Eigen Vector gerou o peso entre os pilares.

Tabela 29: Pontuações normalizadas para critérios ambientais e sociais

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	Norm.
Ambiental	0,30	0,39	0,34	0,73	0,99	0,54	0,92	1,00	1,00	0,69
Social	0,73	0,85	0,94	0,81	0,98	0,72	0,90	1,00	1,00	0,88

A Tabela 29 foi convertida na matriz de prioridade entre os pilares (Ambiental e Social) de acordo com o método pesos entre método Eigen Vector que resultou na Tabela 30.

Tabela 30: Intensidade de importância atribuída aos nove cenários de destinação final – SOCIAL e AMBIENTAL

	Ambiental	Social
Ambiental	1	0,78
Social	1,28	1

Tabela 31: Prioridades entre os cenários – SOCIAL e AMBIENTAL

Pilares	Cálculo de peso
Ambiental	0,44
Social	0,56

5.4.5 Ponderando as alternativas

Desta maneira os resultados foram agregados na Tabela 32 abaixo onde após a multiplicação dos pesos pelos cenários. Os mesmos foram classificados de acordo com o ranking entre os cenários.

Tabela 32: Índice de sustentabilidade entre os cenários

Hierarquia	Cenários	Peso
1	9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	0,142
2	8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva).	0,141
3	5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual).	0,140
4	7) 100% para incineração.	0,129
5	4) 50% para aterro, 50% para incineração.	0,109
6	3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração.	0,091
7	6) 100% para aterro.	0,089
8	2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro.	0,087
9	1) Atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% enviada para cooperativas de triagem).	0,073

Os resultados demonstraram que os cenários de reciclagem tiveram um melhor desempenho conjunto (Ambiental e Social), seguidos de incineração (0,129) e aterro (0,073).

Os cenários híbridos tiveram classificação intermediária de acordo com a percentagem de Reciclagem, Incineração e Aterro.

Dentro dos cenários de reciclagem a maior percentagem de coleta seletiva através de Ecopontos gerou uma melhor classificação.

O pior cenário com relação aos pilares socioambientais foi o cenário base: cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem).

Para fins de validação do modelo foi realizada a análise de sensibilidade para verificar se uma alteração nos pesos entre os pilares Social e Ambiental influenciam no resultado final da sustentabilidade, o que gerou a Tabela 33.

Tabela 33: Análise de sensibilidade índices de sustentabilidade

Cenários	Hierarquia	Peso 50% Ambiental 50% Social	Hierarquia	Peso 70% Ambiental 30% Social	Hierarquia	Peso 30% Ambiental 70% Social
Cenário 1	9	0,07	9	0,06	9	0,08
Cenário 2	8	0,08	7	0,08	7	0,09
Cenário 3	7	0,09	8	0,07	6	0,10
Cenário 4	5	0,11	5	0,11	5	0,11
Cenário 5	3	0,14	3	0,15	3	0,13
Cenário 6	6	0,09	6	0,09	8	0,09
Cenário 7	4	0,13	4	0,14	4	0,12
Cenário 8	2	0,14	2	0,15	2	0,14
Cenário 9	1	0,14	1	0,15	1	0,14

Observa-se que nas cinco primeiras posições não houve alteração apesar de alterar os pesos entre os pilares Social e Ambiental. Ficando as alterações de ranking das posições de 6 a 9 conforme o melhor desempenho que o cenário teve em relação ao pilar de maior peso na análise de sensibilidade colocada.

5.5 CONCLUSÃO DESTE CAPÍTULO

Este trabalho teve como objetivo gerar uma estrutura base para a integração entre as Avaliações do Ciclo de Vida através da metodologia AHP modificada. Onde foi possível sua estruturação através das etapas .

1. Definir os objetivos

2. Definir critérios dos pilares
3. Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência
4. Definir os pesos entre os pilares (Ambiental /Social) e a razão de consistência
5. Ponderando as alternativas

Um dos pontos mais criticados na metodologia AHP foi contornado através da utilização dos resultados normalizados das avaliações do ciclo de vida para servirem de base de ponderação entre os cenários. O mesmo ocorreu entre os pilares de sustentabilidade Social e Ambiental. Através da utilização do método de Vetor de Eigen foram estabelecidas as prioridades (peso) entre os entes analisados sem a participação de especialistas. Fato esse que gera um apoio à tomada de decisão de maneira imparcial, centrada nos resultados dos impactos analisados.

O estudo de caso em questão revelou um caminho de disposição mais sustentável para 9 alternativas de disposição e resíduos de garrafas PET. Os resultados das avaliações dos ciclos de vida Ambiental e Social foram agregados através da metodologia AHP modificada. Os resultados da integração da ACV- Ambiental gerou o seguinte ranking de melhor impacto sócio-ambiental:

- Cenário 9 - 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).
- Cenário 8 - 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),
- Cenário 5 - 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);
- Cenário 7 - 100% para incineração,
- Cenário 4 - 50% para aterro, 50% para incineração;
- Cenário 3 - 50% para cooperativas de triagem, 50% para incineração;
- Cenário 6 - 100% para aterro;
- Cenário 2 - 50% para cooperativas de triagem, 50% para aterro;
- Cenário 1 cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,

A destinação final dos resíduos de garrafa PET tem melhor impacto nos cenários de reciclagem enquanto seguida do cenário de incineração, e aterro respectivamente. A pior disposição ocorre no cenário 1 (cenário atual da cidade de Bauru). Logo, pode-se observar através dos resultados que existe um caminho para a melhoria socioambiental da cidade

através da expansão da captação de resíduos recicláveis por meio de Ecopontos. O que pode ser realizado através de campanhas de marketing, incentivo através de reembolso nos Ecopontos, introdução de novos Ecopontos, disseminação da educação ambiental nas escolas e bairros.

O cenário 7 incineração foi incluído para análise de possível instalação na cidade, porém como explicitado segundo a descrição do modelo os cenários de reciclagem tiveram melhor desempenho. Fato que torna primordial o investimento na área de reciclagem não somente na triagem, mas na agregação de valor aos resíduos. Estabelecendo processo de produção de flocos e grãos.

Sugere-se para próximas pesquisas que utilizem os *framework's* para avaliação ambiental e social, e realizem a ACV econômica, utilizando para a integração o *framework* apresentado neste trabalho.

CONCLUSÃO DA TESE

Este capítulo final da tese apresenta a síntese dos resultados e contribuições encontradas alcançados em resposta aos objetivos estabelecidos. Por fim é descrito as sugestões de estudos futuros.

A problemática dos resíduos é um tema atual que precisa ser tratado com relevância. Essa problemática foi discutida no Capítulo 1. Onde foi definido o objetivo geral da tese: Estabelecer um *framework* para a realização de ACV e a ACV Social no momento em que a garrafa PET é descartada pelo usuário final, explorando alternativas que combinem a coleta seletiva convencional, utilização de Ecopontos e destinação final dos resíduos da garrafa PET não aproveitados para reciclagem.

Para alcançar esse objetivo este trabalho foi segregado em três objetivos específicos. A seguir apresenta-se esses objetivos específicos e as principais contribuições encontradas referente a cada um deles.

O Objetivo específico A foi “Definir quais são os fatores que realmente influenciam na avaliação da sustentabilidade, através da identificação dos fatores determinantes para aplicação da avaliação do ciclo de vida (ACV) na fronteira do descarte da garrafa PET pelo usuário final até as cooperativas de reciclagem da garrafa PET e destino final dos resíduos, por meio de uma revisão estruturada da literatura”.

No capítulo 2, em resposta a esse objetivo específico A foi realizada a revisão estruturada da literatura sobre a avaliação do ciclo de vida da Garrafa PET, abordando uma revisão bibliográfica sobre os resíduos de Garrafa PET (Logística Reversa, Ciclo de vida da garrafa PET e Avaliação do Ciclo de Vida). Nesta etapa foi possível mapear sistematicamente a literatura quanto a aplicação da ACV dos resíduos de garrafa PET, evidenciando a lacuna de pesquisa e os fatores determinantes para a execução desta ferramenta. Esses fatores determinantes para a execução da ACV foram chamados de recomendações, e no total foram 8, a saber:

R1: Promover um número maior de estudos em países em desenvolvimento, integrando diferentes abordagens de reciclagem entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Assim integrando vários contextos distintos dentro da sustentabilidade: Financeira, Ambiental e Social.

R2: Verificar a associação direta entre a economia circular dentro da cadeia do PET, buscando uma análise que dê retorno dos resíduos de PET às cadeias de produtos existentes.

R3: Recomenda-se empregar a técnica estudo de caso para avaliar os impactos do sistema sob a ótica da ISO 14040 e ISO 14044 para aspectos ambientais e esse mesmo conjunto de normas em consonância com as diretrizes da UNEP/SETAC (2009, 2013) para o aspecto social, realizando a integração das ACV pela abordagem multicritério.

R4: Utilizar a avaliação do ciclo de vida para quantificar cenários de coleta seletiva, além da etapa de transporte. Como por exemplo, a estocagem intermediária ao longo do processo: Ecoponto e ponto fixo.

R5: Comparar o valor local dos valores encontrados na ACV referente aos dados primários com os valores disponibilizados em banco de dados consolidados, e assim criar uma normalização para os demais itens do sistema analisado. E, só então realizar a análise do sistema.

R6: Recomenda-se utilizar dados primários na etapa de coleta seletiva, posto que eles são a porta da reciclagem e diferentes maneiras de coletar podem influenciar nos impactos sobre o sistema.

R7: Vincular a aplicação aos tipos de reciclagem às aplicações dos materiais reaproveitados, favorecendo assim a avaliação do ciclo de vida e a economia circular.

R8 : Utilizar metodologias que integrem os indicadores social, operacional, financeiro e ambiental de modo a agregá-los em indicadores globais do sistema, para assim consolidar análises de sensibilidade que possam mensurar o peso de cada área de maneira quantitativa.

Essas recomendações serviram de entradas para a execução das ACV's e estabelecimento dos *Frameworks*.

Ainda no Capítulo 2 estabeleceu-se as fases do *framework* para a execução das ACV's social e ambiental bem como sua integração através do método do AHP modificado, integrando assim as conexões entre os objetivos específicos e o geral. Nesta seção realizou-se a descrição dos materiais e métodos adotados para a condução do trabalho, contendo: *Framework* para aplicação da integração da ACV Social e Ambiental, bem como os *frameworks* para avaliação Ambiental e Social.

Também neste capítulo é transcrito o caminho metodológico entregue no estudo de caso de resíduos de garrafas PET, objeto de estudo (município de Bauru, a seleção e caracterização dos tratamentos fim de vida); desenvolvimento dos cenários (o dimensionamento e a descrição dos sistemas de tratamento); modelagem dos cenários (definição do modelo hidrológico e seus principais dados de entrada); delimitação de objetivos e escopo do estudo de ACV e ACV-S.

No capítulo 3 (Objetivo específico B) foi possível estabelecer um *framework* para avaliar os impactos ambientais, e aplicar essa estrutura de avaliação sobre um estudo de caso contendo 9 alternativas de destinação de resíduos de garrafas PET descartadas pelo usuário final no município de Bauru, São Paulo. Onde foi possível encontrar a rota mais sustentável (aspecto ambiental) para destinação dos resíduos de garrafa PET, bem como uma estrutura base para nortear trabalhos futuros.

No estudo de caso observou-se que os cenários de reciclagem superaram os cenários de incineração em todas as categorias de impacto analisadas, indicando que a reciclagem pode ser uma opção melhor do que a incineração, do ponto de vista ambiental, para o município de Bauru.

Já no capítulo 4 foi possível completar o atendimento ao Objetivo específico B atendendo o pilar social. Onde foi possível estabelecer um *framework* para avaliar os impactos sociais e aplicar essa estrutura de avaliação sobre um estudo de caso contendo 9 alternativas de destinação de resíduos de garrafas PET descartadas pelo usuário final no município de Bauru, São Paulo.

Neste capítulo 4 encontrou-se a rota mais sustentável quanto aos requisitos do pilar Social para destinação dos resíduos de garrafa PET bem como uma estrutura base para nortear trabalhos futuros. O estudo demonstrou que a maneira como se coleta os resíduos recicláveis influencia diretamente os impactos sociais sobre o sistema. Ainda foi possível estabelecer através da metodologia utilizada um ranking dos melhores cenários quanto aos impactos sociais positivos.

Por fim, no capítulo 5 foi possível atender o Objetivo específico C gerando uma estrutura em forma de *framework* para integrar os impactos ambientais e sociais.

Ao longo do capítulo 5 pode se estabelecer um caminho para encontrar a rota mais sustentável com relação aos aspectos socioambientais para destinação dos resíduos de garrafa PET através de um *framework*. Assim, podendo nortear trabalhos futuros nesta aplicação.

Esse capítulo utilizou a metodologia AHP Modificado onde estruturou a integração das ACV's em 5 etapas: Definir os objetivos, Definir critérios dos pilares, Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência, Definir os pesos entre os pilares (Ambiental /Social) e a razão de consistência, Ponderando as alternativas.

Neste capítulo modificou-se a utilização da metodologia AHP devido às críticas quanto a possível parcialidade do painel de especialistas ao darem peso para os sistemas analisados.

Assim, utilizou-se os resultados normalizados das avaliações do ciclo de vida para servirem de base de ponderação entre os cenários. De maneira análoga realizou a ponderação entre os pilares de sustentabilidade Social e Ambiental. Por meio da utilização do método de Vetor de Eigen foram estabelecidas as prioridades (peso) entre os elementos analisados sem participação de especialistas. Assim, o método AHP modificado apresentado pode apoiar a tomada de decisão de maneira imparcial, focalizando nos resultados dos impactos para realizar a ponderação.

Sugestão de pesquisas futuras

Este trabalho não considerou a quantidade de resíduos de PET coletados informalmente pelos catadores devido à falta de informações e dados oficiais da cidade de Bauru. Sugere-se que trabalhos futuros busquem estimar o volume e a destinação dos resíduos de PET coletados dessa forma em Bauru e em outras localidades utilizando os *frameworks* propostos.

Sugere-se para próximos trabalhos empregar outras análises de sensibilidade nos próximos trabalhos a variação do modo de coleta para os cenários de coleta convencional atrelados ao Aterro e Incineração. Também seria de grande valia aplicar essa metodologias para outros tipos de resíduos sólidos urbanos.

E por fim, sugere-se para próximos trabalhos que seja incluído na integração do modelo apresentado o pilar econômico da avaliação do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. **Censo da reciclagem no Brasil**, 10^a Edição. 2016a.

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. **Indústria no PET no Brasil – Mercado, Perspectivas, Reciclagem** (2016b). Disponível em: <http://www.abipet.org.br/uploads/File/Market%20Overview%202013.pdf>
Acesso em: 20/03/2017.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT. 2014a.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida. Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT. 2014b.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2014**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em 08/10/2020

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2018/2019**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em 08/10/2020

ACCORSI, Riccardo; VERSARI, Lorenzo; MANZINI, Riccardo. Glass vs. Plastic: Life Cycle Assessment of Extra-Virgin Olive Oil Bottles across Global Supply Chains. **Sustainability**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.2818-2840, 2015.

AGANOVIC, Kemal et al. Pilot scale thermal and alternative pasteurization of tomato and watermelon juice: An energy comparison and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 141, p.514-525, jan. 2017.

AKANUMA, Yasuhiko; SELKE, Susan E. M.; AURAS, Rafael. A preliminary LCA case study: comparison of different pathways to produce purified terephthalic acid suitable for synthesis of 100 % bio-based PET. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 19, n. 6, p.1238-1246, 25, 2014.

AKHTAR, S. et al. Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 4, p. 973–992, 2015.

AMIENYO, D. et al. Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 77–92, 2013.

AMLINGER, F.; PEYR, S.; CUHLS CARSTEN, C. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. **Waste Management and Research**, v. 26, n. 1, p. 47–60, 2008.

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução RDC nº 20, de 26 de março de 2008**, 2008.

ANVISA. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA.. **Consulta Alimentos**, (2020). Disponível em: <https://consultas.anvisa.gov.br/#/alimentos/c/?nomeProduto=PET&categorias=4300031> Acesso em 08/10/2020.

ARAÚJO, A. C. MATSUOKA, E. M.; UNG, J. E; HILSDORF, W. C.; SAMPAIO, M. Logística reversa no comércio eletrônico: um estudo de caso. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 303-320, 2013.

ARCESE, G.; LUCCHETTI, M. C.; MASSA, I. Modeling Social Life Cycle Assessment framework for the Italian wine sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 1027–1036, 2017.

ARCESE, G.; LUCCHETTI, M. C.; MERLI, R. Social life cycle assessment as a management tool: Methodology for application in tourism. **Sustainability (Switzerland)**, v. 5, n. 8, p. 3275–3287, 2013.

ARIVUMANI, A. Sustainable Development | 1 Case Studies. v. 11, n. 7, p. 296–300, 2017.

AZIZ, R.; CHEVAKIDAGARN, P.; DANTERAVANICH, S. Life cycle sustainability assessment of community composting of agricultural and agro industrial wastes. **Journal of Sustainability Science and Management**, v. 11, n. 2, p. 57–69, 2016.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. Editora Bookman , 5 ed. 2009.

BENAVIDES, P. T. et al. Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 6, n. 8, p. 9725–9733, 2018.

BIOLCHINI, J. . et al. Systematic review in software engineering. System Engineering and Computer Science Department COPPE/UFRJ. **Technical Report ES**, v. 679, n. 5, p. 1–30, 2005.

BOLLIGER, R.; BAUER, CH. Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6 ecoinvent data v2.0, vol. 6. Dübendorf and Villigen, Switzerland: Swiss Center for LCI, PSI, 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, Brasil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm.. Acesso em: 20/03/2015.

BRUNDTLAND, G. H.; COMUM, Nosso Futuro. Relatório Brundtland. **Our Common Future: United Nations**, 1987.

CADENA, E.; COLÓN, J.; ARTOLA, A.; SÁNCHEZ, A.; Font, X. Environmental impact of two aerobic composting technologies using Life Cycle Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 14 (5), pp. 401-410, 2009

CARLISLE, A. A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano Estocolmo, 1972. **The Forestry Chronicle**, v. 48, n. 3, pág. 118-118, 1972.

CHAHLA, G. A.; ZOUGHAIB, A. Agent-based conceptual framework for energy and material synergy patterns in a territory with non-cooperative governance. **Computers and Chemical Engineering**, v. 131, 2019.

CHEN, L.; PELTON, R. E.; SMITH, T. M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 137, p.667-676, nov. 2016.

CHILTON, T.; BURNLEY, S.; NESARATNAM, S. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1241–1249, 2010.

COELHO, T. M.; CASTRO, R.; JR, J. A. G. PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. **“Resources, Conservation & Recycling”**, n. January, 2011.

CORRÊA, A. P.M; SILVA, M. E. A Logística Reversa Sob a Perspectiva Produção-Mercado-Consumo: O Caso O Boticário. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. Vol.2, n. 1, p. 97-122, 2013.

COSTA, D.; QUINTEIRO, P.; DIAS, A. C. A systematic review of life cycle sustainability assessment: Current state, methodological challenges, and implementation issues. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 774–787, 2019.

DE LUCA, A. I. et al. Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A Life Cycle Sustainability Assessment case study in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1187–1202, 2018.

DE OLIVEIRA, F. L. Triangulação metodológica e abordagem multimétodo na pesquisa sociológica: vantagens e desafios. **Ciências Sociais Unisinos**, v. 51, n. 2, p. 133–143, 2015.

DOKA, G.). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final report ecoinvent data v2.0, vol. 13. Dübendorf, Switzerland: Swiss Center for LCI, Empa – TSL, 2007.

DOKA, G.. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Final report ecoinvent data v2.1, vol. 13. Dübendorf, Switzerland: Swiss Center for LCI, Empa – TSL, 2008.

DOKA, G.. Updates to Life Cycle Inventories of Municipal Waste Incineration. Zürich, Switzerland., 2013.

DOS SANTOS, M. F. N.; BATTISTELLE, R. A. G.; BEZERRA, B. S.; VARUM, HUMBERTO S.A. Comparative study of the life cycle assessment of particleboards made of residues from sugarcane bagasse (*Saccharum spp.*) and pine wood shavings (*Pinus elliottii*). **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 345-355, 2014

EKENER, E. et al. Developing Life Cycle Sustainability Assessment methodology by applying values-based sustainability weighting - Tested on biomass based and fossil

transportation fuels. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 337–351, 2018.

ELDUQUE, A. et al. LCI databases sensitivity analysis of the environmental impact of the injection molding process. **Sustainability (Switzerland)**, v. 7, n. 4, p. 3792–3800, 2015.

ELKINGTON, J. Triple bottom line revolution: reporting for the third millennium. **Australian CPA**, v. 69, p. 75, 1994.

FIORINI, P. DE C.; JABBOUR, C. J. C. Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 4, p. 241–249, 2017.

FOOLMAUN, R. K.; RAMJEAUN, T. Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. **Environment, Development and Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 783–806, 2013a.

FOOLMAUN, R. K.; RAMJEEAWON, T. Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 1, p. 155–171, 2013b.

FORMIGONI, A.; SANTOS, S. DA C.; MEDEIROS, B. T. Logística reversa e sustentabilidade para a melhoria da cadeia: Uma abordagem no panorama da reciclagem PET no Brasil. **RMS-Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 4, n. 3, p. 108–125, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GLEICK, P H; COOLEY, H s. Energy implications of bottled water. **Environmental Research Letters**, v. 4, n. 1, p. 1-6, 2009.

GOEDKOOPE, Mark et al. ReCiPe 2008. **A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level**, v. 1, p. 1-126, 2009.

GOMES, T. S.; VISCONTE, L. L. Y.; PACHECO, E. B. A. V. Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, n. 3, p. 533–548, 2019.

GOVINDAN, K.; SARKIS, J.; PALANIAPPAN, M. An analytic network process-based multicriteria decision making model for a reverse supply chain. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 1–4, p. 863–880, 2013.

HOSSAINI, N. et al. AHP based life cycle sustainability assessment (LCSA) framework: a case study of six storey wood frame and concrete frame buildings in Vancouver. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 58, n. 7, p. 1217–1241, 2015.

HOTTLE, Troy A.; BILEC, Melissa M.; LANDIS, Amy E.. Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 122, p.295-306, 2017.

HUANG, Shupe; AN, Haizhong; VIGLIA, Silvio; BUONOCORE, Elvira; FANG, Wei; ULGIATI, Sergio. Revisiting China-Africa trade from an environmental perspective. **Journal Of Cleaner Production**, v. 167, p. 553-570, 2017.

HUERTAS-VALDIVIA, I. et al. Social life-cycle assessment: A review by bibliometric analysis. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 15, p. 1–25, 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de geografia e Estatística **Panorama: Brasil/São Paulo/Bauru**. 2020.

INGRAO, C. et al. Recycled-PET fibre based panels for building thermal insulation: Environmental impact and improvement potential assessment for a greener production. **Science of the Total Environment**, v. 493, p. 914–929, 2014.

INGRAO, Carlo et al. A comparative Life Cycle Assessment of external wall-compositions for cleaner construction solutions in buildings. **Journal Of Cleaner Production**, v. 124, p.283-298, 2016.

JABBOUR, A.B. L, JABBOUR, C.J. C, SARKIS, J; GOVINDAN. K. Brazil's new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Technol. Environ. Policy**, v. 16, n. 1, p. 7–9, 2014.

JUNGBLUTH, N.; CHUDACOFF, M.; DAURIAT, A.; DINKEL, F.; DOKA, G.; Faist Emmenegger, M.; Gnansounou, E.; Kljun, N.; Spielmann, M.; Stettler, C.; Sutter, J. . Life Cycle Inventories of Bioenergy. **Final report ecoinvent v2.0**, vol.17, 2007.

KÄGI, T.; ZSCHOKKE, M.; STETTLER, C. Life Cycle Inventories for Swiss Recycling Processes-Part Carbotech: Recycling of Cardboard, Glass, PE, PET, Tinplate. **Im Auftrag des BAFU**, 2017.

KANG, D. H.; AURAS, R.; SINGH, J. Life cycle assessment of non-alcoholic single-serve polyethylene terephthalate beverage bottles in the state of California. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 45–52, 2017.

KELLER, M. Handbook emission factors for road transport 3.1. **Bern: INFRAS.**, 2010.

KLEWITZ, J.; HANSEN, E. G. Sustainability-oriented innovation of SMEs: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 57–75, 2014.

KLOEPFFER, Walter. Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89, 2008.

KOMLY, C. E. et al. Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 69, p. 66–81, 2012.

KUCZENSKI, B.; GEYER, R. PET bottle reverse logistics - Environmental performance of California's CRV program. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 456–471, 2013.

LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Variations of the kanban system: Literature review and classification. **International Journal of Production Economics**, v. 125, n. 1, p. 13–21, 2010.

LEEJARKPAI, Thanawadee; MUNGCHAROEN, Thumrongrut; SUWANMANEE, Unchalee. Comparative assessment of global warming impact and eco-efficiency of PS (polystyrene), PET (polyethylene terephthalate) and PLA (polylactic acid) boxes. **Journal Of Cleaner Production**, v. 125, p.95-107, 2016.

LUZ, L. M. DA et al. Integrating life cycle assessment in the product development process: A methodological approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 28–42, 2018.

MANFREDI, M.; VIGNALI, G.. Comparative Life Cycle Assessment of hot filling and aseptic packaging systems used for beverages. **Journal Of Food Engineering**, v. 147, p.39-48, 2015.

MARTIN, E. J. P. et al. Dataset for life cycle assessment of pet bottle waste management options in Bauru, Brazil. **Data in Brief**, v. 33, p. 106355, 2020.

MARTIN, E. J. P. et al. Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of Bauru, Brazil. **Waste Management**, v. 119, p. 226–234, 2021.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p.160-175, 2015.

MICHAUD, J.-C. et al. Environmental benefits of recycling - 2010 update. **Waste resource action programme. WRAP**, n. March, p. 1–252, 2010.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>. Acesso em: 13/11/2015.

NAKATANI, Jun et al. Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer PET bottles. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 6, p. 590-597, 2010.

NAVAJAS, A.; URIARTE, L.; G., L. M. Application of eco-design and life cycle assessment standards for environmental impact reduction of an industrial product. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1724, 2017.

NEMECEK, T.; KÄGI, T.; BLASER, S. Life cycle inventories of agricultural production systems. **Final report ecoinvent v2. 0 No**, v. 15, 2007.

NEUGEBAUER, S. et al. Calculation of Fair wage potentials along products' life cycle – Introduction of a new midpoint impact category for social life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 1221–1232, 2017.

NEVES, Fábio de Oliveira. Gestão dos resíduos sólidos urbanos na bacia do Paraná III: propostas para uma agenda de pesquisa. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 38, p.

169 - 194, 2016.

NZILA, C. et al. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. **Applied Energy**, v. 93, p. 496–506, 2012.

OLIVEIRA, L. R.; MEDEIROS, R. M.; TERRA, P. B.; QUELHAS, O. L.G. Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. **Production**, v. 22, n. 1, p. 70-82, 2011.

OPHER, T.; FRIEDLER, E.; SHAPIRA, A. Comparative life cycle sustainability assessment of urban water reuse at various centralization scales. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 7, p. 1319–1332, 2019.

PAPONG, S. et al. Comparative assessment of the environmental profile of PLA and PET drinking water bottles from a life cycle perspective. **Journal Of Cleaner Production**, v. 65, p.539-550, 2014.

PARK, J. Y.; GUPTA, C. Evaluating localism in the management of post-consumer plastic bottles in Honolulu, Hawai'i: Perspectives from industrial ecology and political ecology. **Journal of Environmental Management**, v. 154, p. 299–306, 2015.

PETTI, L.; SERRELI, M.; DI CESARE, S. Systematic literature review in social life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 3, p. 422–431, 2018.

PRADO, M. R.; NETO, G. K. A análise do ciclo de vida como ferramenta de otimização de processos e gestão ambiental. Voos Revista Polidisciplinar Eletrônica da Faculdade Guairacá, v. 1, n. 1, 2005.

PLANO DIRETOR PARTICIPATIVO. **Etapas do Projeto**. 2020. Disponível em: <https://sites.bauru.sp.gov.br/planodiretor/etapas.aspx?i=4>. Acesso em 02/02/2020.

PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema de Manejo dos Resíduos Sólidos e Limpeza Urbana**, 2016. Disponível em: https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_meioambiente/plano_saneamento/Sistema_de_Manejo_dos_Residuos_Solidos_e_Limpeza_Urbana.pdf. Acesso em 10/03/2019.

PLANO MUNICIPAL SANEAMENTO BÁSICO. **Variável Limpeza Urbana e Manejo de Resíduos Sólidos**. 2014. Disponível em: https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_meioambiente/plano_residuos/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20do%20PMSB%20Bauru.pdf. Acesso em 10/03/2019.

PRASARA-A, J.; GHEEWALA, S. H. Applying Social Life Cycle Assessment in the Thai Sugar Industry: Challenges from the field. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 335–346, 2018.

PLASTICS EUROPE – Association of Plastics Manufacturers. An Eco-profile and Environmental Product Declaration of the PET Manufacturers in Europe: Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle grade), 2017. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/eco-profiles>. Acesso em: 10/02/2018.

PLASTICS INSIGHT. Polyethylene Terephthalate (PET): Production, Price, Market and its Properties, 2019. Disponível em: <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyethylene-terephthalate/>. Acesso em: 09/05/2019.

PRETTY, J. N.; MASON, C.r F.; NEDWELL, D. B.; HINE, R. E.; LEAF, S.; DILS, R.. Environmental Costs of Freshwater Eutrophication in England and Wales. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 2, p. 201-208, 2003.

RIGAMONTI, L.; GROSSO, M.; GIUGLIANO, M. Life cycle assessment of sub-units composing a MSW management system. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 16–17, p. 1652–1662, 2010.

ROY, P-O.r; DESCHÊNES, L.; MARGNI, M.. Life Cycle Impact Assessment of Terrestrial Acidification: modeling spatially explicit soil sensitivity at the global scale. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 15, p. 8270-8278, 18, 2012.

SAFDAR, N. et al. Reverse logistics network design of e-waste management under the triple bottom line approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 272, p. 122662, 2020.

SALEH, Y.. Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine. **Journal Of Cleaner Production**, v. 131, p.28-42, set. 2016.

SAUTIER, M. et al. Sustainability: A tool for governing wine production in New Zealand? **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 347–356, 2018.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Open-loop recycling: a lca case study of pet bottle-to-fibre recycling. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 55, n. 1, p. 34-52, 2010.

SILVA, R. R.; RODRIGUES, F. T. R. L. Análise do ciclo de vida e da logística reversa como ferramentas de gestão sustentável: o caso das embalagens PET. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, Florianópolis, SC, Brasil, v. 7, n. 13, p. 44-58, 2015.

SOUSA, S. R. Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida. **Dissertação De Mestrado**, p. 87, 2008.

SOUZA, D. M.; TEIXEIRA, R. F.M.; OSTERMANN, O. P. Assessing biodiversity loss due to land use with Life Cycle Assessment: are we there yet?. **Global Change Biology**, v. 21, n. 1, p.32-47, 2014.

SPINELLI, M. V. P. et al. Estudo Sustentvel da Capacidade de Carga Antrópica e a sua Influência no Ponto de Equilíbrio da Resiliência Ambiental (Sustainable Study of the Anthropic Carrying Capacity and Its Influence on the Point of Equilibrium of the Environmental Resilience). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 1, p. 185-199.1, 2016.

SU, S. et al. BIM-DLCA: An integrated dynamic environmental impact assessment model for buildings. **Building and Environment**, v. 183, n. August, p. 107218, 2020.

SUNDQVIST, J.O. Avaliações de ciclos de vida e resíduos sólidos - Diretrizes para

tratamento e disposição de resíduos sólidos na ACV (Relatório Final). **Agência Sueca de Proteção Ambiental**. Retirado de: Avaliações de ciclos de vida e resíduos sólidos - Diretrizes para tratamento e disposição de resíduos sólidos em ACV, 1999.

TAKO, A. A.; KOTIADIS, K. PartiSim: A multi-methodology framework to support facilitated simulation modelling in healthcare. **European Journal of Operational Research**, v. 244, n. 2, p. 555–564, 2015.

TONIOLO, S. et al. Comparative LCA to evaluate how much recycling is environmentally favourable for food packaging. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 77, p. 61–68, 2013.

UNEP/SETAC. **Guidelines for social life cycle assessment of products**. Paris: United Nations Environment Program SETAC Life Cycle Initiative United Nations Environment Programme, 2009.

UNEP/SETAC. **The Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA)**. Paris: United Nations Environment Program SETAC Life Cycle Initiative United Nations Environment Programme, 2013.

VAN UYTVANCK, P. P. et al. Impact of Biomass on Industry: Using Ethylene Derived from Bioethanol within the Polyester Value Chain. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 2, n. 5, p.1098-1105, 2014.

VAN UYTVANCK, P.p. et al. Impact on the Polyester Value Chain of Using p-Xylene Derived from Biomass. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, n. 5, p.4119-4126, 2017.

VISENTIN, C. et al. Life cycle sustainability assessment: A systematic literature review through the application perspective, indicators, and methodologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, 2020.

WALL, G. Beyond sustainable development. **Tourism Recreation Research**, v. 43, n. 3, p. 390–399, 2018.

WEBB, H. K. et al. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethylene terephthalate). **Polymers**, v. 5, n. 1, p. 1–18, 2013.

WULF, C. et al. Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 6, p. 1578–1590, 2017.

ZIMDARS, C.; HAAS, A.; PFISTER, S. Enhancing comprehensive measurement of social impacts in S-LCA by including environmental and economic aspects. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 1, p. 133–146, 2018.

APÊNDICE A1 - SISTEMATIZAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES DOS ARTIGOS ANALISADOS.

Artigos	Fatores determinantes a avaliação do ciclo de vida
Ingrao et. al (2016)	Utilização de Software e comparação com banco de dados. Utilização das diretrizes ISO. Utilização do SimaPro v.7.3.3 (SimaPro, 2006) acessando o banco de dados Ecoinvent v.2.2 (Ecoinvent, 2010).
Saleh (2016)	Utilização da Metodologia de avaliação do impacto do ciclo de vida <u>IMPACT 2002p</u> . Utilização de dados regionais para comparação de resultados. Software utilizado Excel Categorias: Tais categorias incluem consumo de água, energia não renovável, resíduos sólidos, toxicidade humana, acidificação terrestre, potencial de aquecimento global e efeitos respiratórios.
Toniolo et. al. (2013)	Utilização de Software ECOINVENT; Separação da análise em etapas. Utilização de análise de sensibilidade. A análise de sensibilidade realizada ajudou a compreender o efeito das escolhas metodológicas sobre os resultados e confirmou que as premissas feitas não alteram a ordem de classificação relativa, com quase todas as categorias preferindo o produto reciclável, apesar da composição aditiva, os cenários de fim de vida e a Final de vida. No entanto, o emprego de um método de avaliação diferente conduziu a uma ordem de ordem relativa oposta em relação a categorias específicas, tais como carcinógenos e ecotoxicidade terrestre.
Akanuma, Selke, Auras (2014)	O software SimaPro 7.3.3 foi utilizado como o principal software computacional e o Impact 2002+ v2.1 foi utilizado como metodologia de avaliação do impacto no ciclo de vida nesta avaliação do ciclo de vida da atribuição
Amienyo et al (2013)	O estudo foi realizado seguindo a metodologia de avaliação do ciclo de vida (LCA) da norma ISO 14040/44. Os dados foram obtidos de um fabricante de bebidas, bem como dos bancos de dados CCaLC, Ecoinvent e Gabi. As ferramentas de software LCA CCaLC v2.0 e GaBi 4.3 foram usadas para modelagem LCA. Os impactos ambientais foram estimados de acordo com o método CML 2001.
Chen; Pelton; Smith (2016)	aLCA (avaliação do ciclo de vida atribucional) --> Modelo para aplicação do LCA. Coleta de dados --> Utilização dos dados das instalações de biorefinaria piloto e de demonstração, um modelo de avaliação de ciclo de vida atribucional tradicional (aLCA) foi aplicado com análise de sensibilidade de premissas fundamentais no sistema. O modelo LCA foi estabelecido através do software ThinkBase GaBi (GaBi, 2014a, b), em conformidade com os padrões ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006). Utilizou-se também o ECOINVENT (Banco de dados).
Elduque et al. (2015)	Método: A análise de impacto foi realizada utilizando o método ReCiPe para injeção plástica do PET. Dados retirados do Ecoinvent.

APÊNDICE A1 - SISTEMATIZAÇÃO DAS CONTRIBUIÇÕES DOS ARTIGOS ANALISADOS.(Continuação).

Artigos	Fatores determinantes a avaliação do ciclo de vida
Foolmaun, Ramjeawon (2013a)	Integração tripé: Econômico, sustentabilidade e social pelo método LCSA - " <i>Life cycle sustainability assessments</i> "
Foolmaun, Ramjeawon (2013b)	Avaliação de ciclo de vida padronizada ISO (LCA) e o software SimaPro 7. 1
Ingrao et al. (2014)	Utilização mista de dados: Retirados do Ecoinvent. V.2.2 com extrapolação de dados colhidos da firma (Dados primários). Os dados da firma foram utilizados por ser uma fonte confiável de dados e ser o foco da pesquisa. Uso do software SimaPro 7.3.3
Kangas; Auras; Singh (2017)	Software SimaPro (PRE Consultants 2011), com o Ecoinvent V2.2.
Leejarkpai; Mungcharoen; Suwanmanee (2016)	Uso de indicadores. Utilização de indicadores globais de aquecimento. Avaliação de indicadores de ecoeficiência (gráfico de portfólio)
Manfredi, M., Vignali, G. (2015)	<u>Método</u> --> A análise de impacto foi realizada utilizando o método ReCipe (Goedkoop et al., 2012), que é a abordagem de indicadores mais recente e harmonizada disponível na avaliação de impacto do ciclo de vida, cada vez mais adotada nas pesquisas de ALC no setor de embalagens. Software --> O SimaPro 7.3 LCA
PAPONG et. al (2014)	Utilização das diretrizes ISO. Software Ecoinvent para a utilização do banco de dados
Park a; Gupta (2015)	Avaliação financeira conjunta com aplicação do LCA apoia melhor a tomada de decisão
Van Uytvanck et. al (2014)	Pacote do software Unisim e LCA Gabi versão 6
Van Uytvanck et. al (2017)	As etapas de análise de inventário e avaliação de impacto foram auxiliadas pelo pacote de fluxogramas de processo Unisim e pelo software LCA Gabi versão 6, respectivamente.

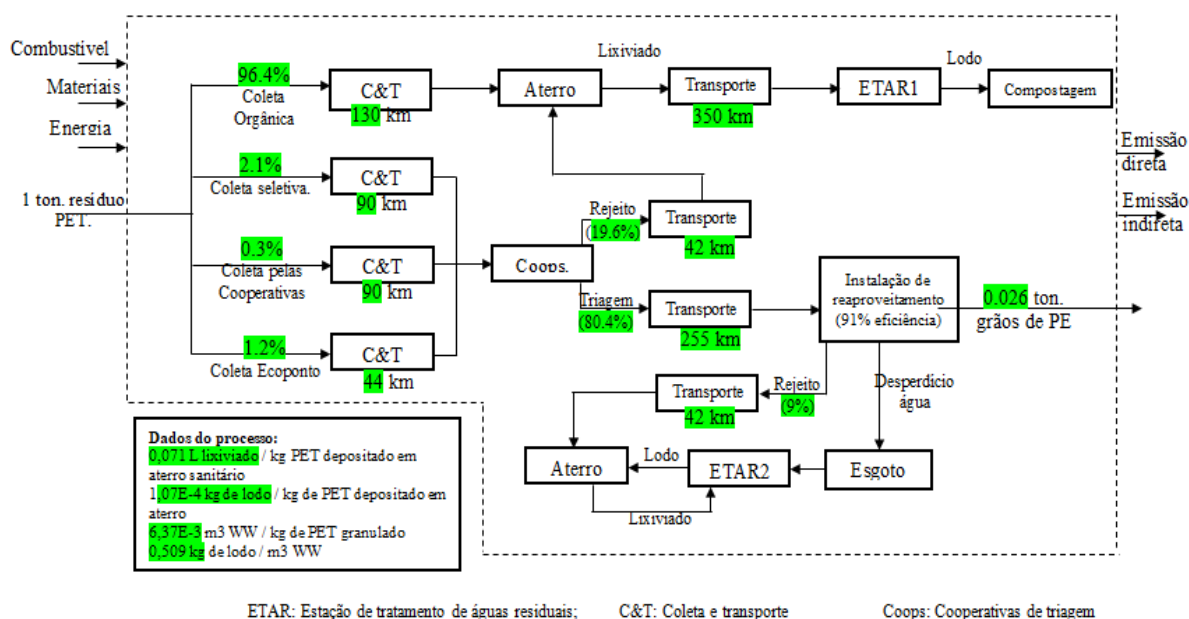
APÊNDICE A2 – FRAMEWORK PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AMBIENTAL DE RESÍDUOS DA GARRAFA PET

Este apêndice seguiu com a mesma estrutura de descrição do *framework* para facilitar sua utilização, ou seja, Objetivo e escopo, Inventário, Avaliação do impacto e Interpretação

Objetivo e escopo.

Modelagem SimaPro: Utilizar o cenário base para modelar (Figura31), porém adaptar a realidade local dos processos do estudo de caso que será aplicado esse *framework*. Em seguida deve-se alimentar com as tabelas do inventário, alterando os parâmetros conforme a realidade local do estudo de caso.

Figura 31: Cenário base para estudo de ACV ambiental



Observa-se que é necessário incluir as eficiências dos processos e as quantidades de rejeito para direcionamento do fluxo de trabalho, e assim correta aplicação ao estudo de área.

Inventário

Para realizar a análise dos resíduos de garrafas pet é necessário obter as quantidades anuais de resíduos de pet, e a respectiva percentagem em cada tipo de coleta. Esses dados deverão ser inseridos na Tabela 34 abaixo nos campos em verde. (planilha está em anexo via QRCODE).

Tabela 34: *Framework* fluxo de material ACV

	Coleta Orgânico	Coleta Seletiva 1	Coleta Seletiva 2	Coleta Seletiva 3	Total
RSU (t)	93.600	1.750	204	720	96.274
% PET em RSU	5,21%	5,94%	8,65%	8,36%	5,4%
PET (t)	4.880	104	18	60	5.062
% of Total PET	96,4%	2,1%	0,3%	1,2%	

Para realizar a análise dos resíduos de garrafas pet é necessário obter as quantidades anuais de resíduos de pet, e a respectiva percentagem em cada tipo de coleta. Esses dados deverão ser inseridos na tabela 34 nos campos em verde.

Tabela 35: *Framework* fluxo de transporte ACV

Descrição de transporte	Distância (km)	Fonte da informação
Coleta orgânico+ transporte para aterro	130	Fonte 1
Coleta seletiva 1 + transporte para cooperativas	90	Fonte 2
Coleta seletiva 2 + transporte para cooperativas	90	Fonte 3
Coleta seletiva 2 + transporte para cooperativas	44	Fonte 4
Transporte de rejeitos de reciclagem de PET das cooperativas para aterro	42	Fonte 5
Transporte de fardos PET das cooperativas para a indústria de reciclagem	255	Fonte 6
Transporte de chorume do aterro sanitário para a Estação de tratamento (ETAR)	350	Fonte 7
Transporte de escórias / resíduos da planta de incineração para o aterro	100	Fonte 8
Transporte de lamas da ETAR para aterro sanitário	11	Fonte 9

Avaliação do ciclo de vida

Preencher as células em verde da Tabela 26 com os resultados da ACV do software Sima Pro. Este preenchimento deverá ser feito na planilha anexa a esse apêndice. O Mesmo gerará o gráfico abaixo que facilitará a etapa de interpretação.

Tabela 36: *Framework* para os resultados da ACV

Cat. Imp.	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1	kg CO2 eq	46,0	-657,7	493,6	1063,1	-1415,9	100,5	2025,7	-1417,2	-1419,1
2	kg CFC-11 eq	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	kg SO2 eq	0,0	-2,4	-2,3	0,2	-5,0	0,1	0,3	-5,0	-5,0
4	kg P eq	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	0,0	0,0	-0,3	-0,3
5	kg 1,4-DB eq	177,6	-125,1	27,9	329,0	-451,3	201,1	456,9	-451,7	-452,2
6	kg 1,4-DB eq	0,0	-0,1	0,1	0,1	-0,2	0,1	0,2	-0,2	-0,2
7	kg 1,4-DB eq	40,6	19,6	33,0	53,5	-3,1	42,2	64,7	-3,1	-3,1

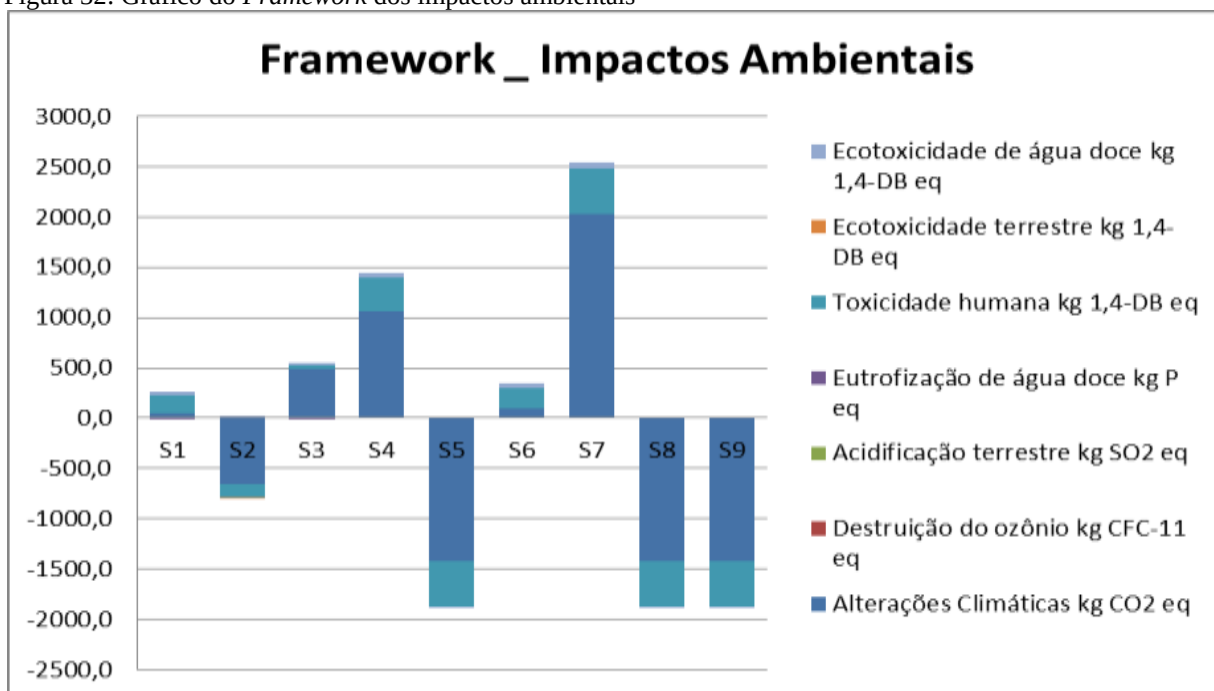
Legenda:

Categoria de impacto (Cat. Imp.)

- 1- Alterações Climáticas
- 2- Destruição do ozônio
- 3- Acidificação terrestre
- 4- Eutrofização de água doce
- 5- Toxicidade humana
- 6- Ecotoxicidade terrestre
- 7- Ecotoxicidade de água doce

Interpretação

Observar os fluxos de processos e os resultados dos gráficos para interpretar os resultados da avaliação do ciclo de vida. Os Gráficos gerados estão apresentados na Figura 32.

Figura 32: Gráfico do *Framework* dos impactos ambientais

Os demais gráficos para avaliação por categoria e utilização das tabelas estão disponíveis através da planilha que pode ser acessada através deste QR CODE:



Avaliação do impacto

A planilha de dados contém o questionário com as categorias, subcategorias e indicadores. Após serem lançados os questionário a planilha retorna as tabela 37 de pontuação que permite avaliar as categorias de impacto.

Tabela 37: Pontuação *Framework* –Social

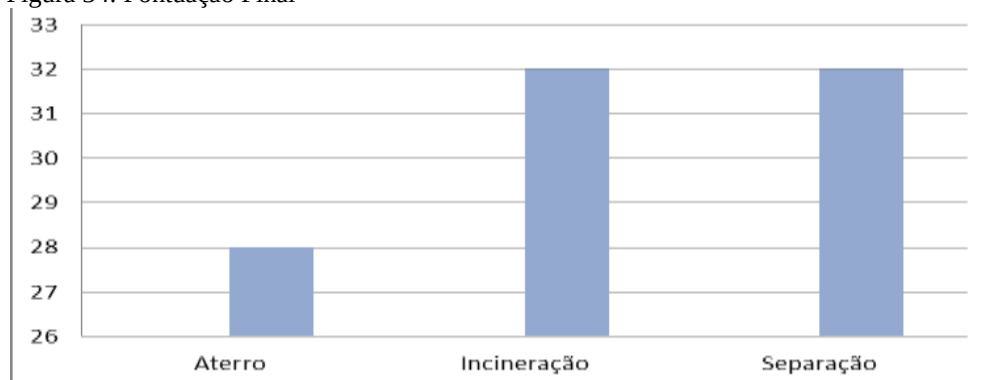
Categorias de Stakeholder	Indicadores de subcategoria			
Trabalhadores		Aterro	Incineração	Separação
	Trabalho infantil	0	4	4
	Salário justo	4	4	4
	Trabalho forçado	4	4	4
	Saúde e segurança	4	4	4
	Benefício social / segurança social	4	4	4
	Discriminação	4	4	4
Sociedade	Contribuição para a economia e Desenvolvimento	4	4	4
Comunidade local	Envolvimento da comunidade	4	4	4
Pontuação total		28,0	32,0	32,0

Obs. : Esses são os resultados do exemplo preenchido na planilha.

Interpretação

Existe também a planilha de pontuação final que permite classificar os cenários de destinação e assim Apoiar a interpretação da melhor alternativa no quesito social. Utiliza-se da expressão gráfica, Figura 34

Figura 34: Pontuação Final



A estrutura acima para a avaliação do ciclo social está disponível através da planilha que pode ser acessada através deste QRCODE:



APÊNDICE A4 – FRAMEWORK PARA INTEGRAÇÃO DAS ACV AMBIENTAL E SOCIAL DE RESÍDUOS DA GARRAFA PET

Este apêndice seguiu com a mesma estrutura de descrição do *framework* para facilitar sua utilização, ou seja, Definir objetivo, Definir critérios dos pilares, Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência, Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência, Ponderando as alternativas.

Definir objetivos. Neste item aponta-se que o sistema tem como objetivo encontrar a alternativa mais sustentável quanto aos pilares escolhidos dentro da base relacional determinada.

Definir critérios dos pilares. Nesse item é necessário escrever os pilares e as diretrizes e a metodologia de execução das avaliações do ciclo de vida individuais. Para a ACV-Ambiental utiliza-se as normas da família ISO 14040 e na ACV-Social utiliza-se as etapas da ISO 14040 seguindo as diretrizes da SETAC/UNEP (2009, 2013).

Definir os pesos entre os cenários e a razão de consistência.: Nessa etapa os resultados das avaliações do ciclo de vida deverão ser normalizados de 0 à 1 para conseguinte comparação.

Para realizar a normalização nesse *framework* basta inserir os dados na planilha anexa a esse apêndice e o mesmo retornará com os valores estabelecidos, Tabela 38

Tabela 38: Dados de entrada ACV Social, sem normalizar

Cenário	Pontuação	Normalização [escala de 0-1]. Referência maior pontuação
1) cenário (base) atual (96,4% da vazão de referência é enviada para aterro, 3,6% é enviada para cooperativas de triagem,	19,50	0,729
2) 50% para cooperativas de triagem, 50% para	22,75	0,850
3) 50% para cooperativas de triagem, 50% para	25,13	0,939
4) 50% para aterro, 50% para incineração;	21,63	0,808
5) 100% para cooperativas de triagem (mantendo a distribuição da coleção atual);	26,25	0,981
6) 100% para aterro;	19,25	0,720
7) 100% para incineração,	24,00	0,897
8) 100% para cooperativas de triagem (50% coletados em Ecopontos, 50% coletados por coleta seletiva),	26,75	1,000
9) 100% para cooperativas de triagem (75% coletados em Ecopontos, 25% coletados por coleta seletiva).	26,75	1,000
Máximo	26,75	

Com relação aos impactos ambientais utilizar a aba normalização ambiental, e preencher os impactos sobre as células em verde, respeitando a ordem de categorias, conforme mostra o modelo abaixo da tabela 39.

Tabela 39: Dados de entrada da ACV sem normalizar

Cat. Imp	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1	kg CO2 eq	46,0	- 657,7	493, 6	1063, 1	- 1415,9	100, 5	2025, 7	- 1417,2	- 1419,1
2	kg CFC-11 eq	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	kg SO2 eq	0,0	-2,4	-2,3	0,2	-5,0	0,1	0,3	-5,0	-5,0
4	kg P eq	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,3	0,0	0,0	-0,3	-0,3
5	kg 1,4-DB eq	177, 6	- 125,1	27,9	329,0	-451,3	201, 1	456,9	-451,7	-452,2
6	kg 1,4-DB eq	0,0	-0,1	0,1	0,1	-0,2	0,1	0,2	-0,2	-0,2
7	kg 1,4-DB eq	40,6	19,6	33,0	53,5	-3,1	42,2	64,7	-3,1	-3,1

Legenda:

Categoria de impacto (Cat. Imp.)

- 1- Alterações Climáticas
- 2- Destruição do ozônio
- 3- Acidificação terrestre
- 4- Eutrofização de água doce
- 5- Toxicidade humana
- 6- Ecotoxicidade terrestre
- 7- Ecotoxicidade de água doce

Após esses lançamentos nos respectivos campos a planilha retorna com a ponderação entre os cenários entre as células AH43:AH51. Atendendo a etapa Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência.

E retornando o peso entre os pilares na célula E13 e E14, respectivamente ao aspecto ambiental e social, atendendo a fase de Definir os pesos entre as ACV's e a razão de consistência.

Por fim os resultados são compilados na figura abaixo, célula inisial AG 42, realiza-se a etapa de ponderação das alternativas.

Tabela 40: Classificação final após integração (Social e Ambiental)

Cenários	Pontuação Final (Ambiental e Social)	Classificação
Cenário 1	0,073	9
Cenário 2	0,087	8
Cenário 3	0,091	7
Cenário 4	0,109	5
Cenário 5	0,140	3
Cenário 6	0,089	6
Cenário 7	0,129	4
Cenário 8	0,141	2
Cenário 9	0,142	1

Pilar ambiental	44%
Pilar Social	56%

A estrutura acima para a avaliação do ciclo social está disponível através da planilha que pode ser acessada através deste QRCODE:

